



Kevin de Oliveira

**Quantificação da relação entre fontes de emissão e a
qualidade do ar na região de Aveiro**



Kevin de Oliveira

Quantificação da relação entre fontes de emissão e a qualidade do ar na região de Aveiro

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica da Doutora Myriam Lopes, Professora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro e da Doutora Vera Rodrigues, Estagiária de Pós-Doutoramento do Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM) e do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

O trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto @CRUISE (PTDC/EMS-TRA/0383/2014), financiado pelo projeto 9471 – Reforçar a Investigação, o Desenvolvimento Tecnológico e a Inovação e apoiado pelo Fundo de Comunidade Europeia FEDER.

o júri

presidente

Professora Doutora Maria Helena Gomes de Almeida Gonçalves Nadais
Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro

vogais

Doutora Joana da Fonseca Valente
Estagiária de Pós-Doutoramento, CESAM - Departamento de Ambiente e Ordenamento da
Universidade de Aveiro

Professora Doutora Myriam Alexandra dos Santos Batalha Dias Nunes Lopes
Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

À minha orientadora, Prof.^a Myriam Lopes um sincero obrigado pelas valiosas sugestões e orientação que em muito enriqueceram este trabalho. Agradeço também por toda a sua disponibilidade e apoio, bem como os conhecimentos transmitidos.

À minha coorientadora, Doutora Vera Rodrigues, a quem dirijo um enorme obrigado pelo imenso tempo disponibilizado e pela forma incansável como sempre acompanhou todas as etapas deste trabalho. Ainda por ter dado motivação e animação quando faltava e por ter feito de tudo para que este trabalho fosse concluído.

Ao meu irmão, ao meu pai e à minha mãe que de uma forma ou de outra sempre fizeram de tudo para estarem presentes e me apoiaram ao longo de todo este tempo. Muito obrigado.

Ao meu avô e avó por tudo o que me proporcionaram, apoiando sempre todas as minhas decisões. Agradeço ainda ao meu avô por todos os conhecimentos transmitidos e leitura minuciosa deste trabalho.

A todos do gabinete e do grupo GEMAC que com enorme simpatia sempre se disponibilizaram a ajudar e a partilhar conhecimentos. Agradeço também por toda a boa disposição e paciência demonstrada.

A todos que de um modo ou de outro me ajudaram na elaboração desta dissertação, um sincero obrigado.

palavras-chave

Qualidade do ar, emissões atmosféricas, modelação CFD, modelo VADIS, poluição do ar, área urbana, Estarreja

Resumo

O aumento da densidade populacional acompanhado de intenso tráfego rodoviário e atividade industrial estão na origem de grandes pressões sobre a qualidade do ar nos centros urbanos. Neste contexto, surge a importância de analisar a cidade de Estarreja que dada a sua proximidade ao Complexo Químico de Estarreja (CQE) e de acessos principais, tais como as autoestradas A1 e A29 e a estrada nacional 109 (EN109) se torna num importante local de estudo.

A crescente preocupação da população relativamente a episódios de poluição juntamente com a mudança da localização da estação de monitorização da qualidade do ar (EMQA) proporcionaram a criação da presente dissertação, a qual visa compreender o efeito das fontes de emissão (indústria e tráfego rodoviário) na qualidade do ar do centro de Estarreja e ainda, avaliar as diferenças entre o antigo local e a localização atual da estação de monitorização. Para atingir os objetivos propostos recorreu-se à modelação numérica utilizando o modelo CFD VADIS. As simulações efetuadas incidiram sobre dois poluentes, NO_x e PM₁₀, sendo que para estes poluentes as fontes assumidas são consideradas representativas do município de Estarreja. De modo a avaliar a influência das condições meteorológicas sobre a qualidade do ar da região, recorreu-se aos dados obtidos na torre de medição da Universidade de Aveiro e optou-se, com base na frequência dos mesmos, por simular com ventos para as velocidades 2 e 5 m.s⁻¹ e de direções de NNW e SE, sendo estas as direções mais frequentes para o segundo e quarto quadrante.

Com base nos resultados obtidos nas simulações, observou-se que a via com o maior impacto é a EN109 e que para ventos de NNW os poluentes são arrastados existindo uma significativa acumulação a sul do domínio causada pela vegetação e pelos edifícios. Contudo o centro do município de Estarreja é mais afetado para ventos de SE na qual se observa a existência de uma vasta área por todo o domínio com concentrações elevadas. As concentrações são máximas para as mais baixas velocidades do vento, nomeadamente, 2 m.s⁻¹.

Na análise pormenorizada ao local antigo em Estarreja-Teixugueira e o local atual na Escola Secundária de Estarreja, observou-se que para os ventos mais frequentes os locais escolhidos para as estações não refletem o impacto que a EN 109 tem na qualidade do ar da região. Para ventos de SE, verifica-se unicamente a influência das vias circundantes não sendo assim representativo das concentrações medidas na região.

keywords

Air quality, atmospheric emissions, CFD modeling, VADIS model, air pollution, urban area, Estarreja

abstract

The increase of population density followed by the increased road traffic and industrial activity have a vast impact on air quality in urban centers. In this context, it's important to study and analyze the city of Estarreja, given its proximity to the Chemical Complex of Estarreja and to major road accesses, such as the A1 and A29 highways and the national road 109 (EN109).

The growing concern of the population regarding air pollution episodes along with the change of the location of the air quality monitoring station led to the creation of this thesis, which aims to understand the effect of emission sources such as industry and road traffic in the air quality of Estarreja and to evaluate the differences between the old location (Estarreja-Teixugueira) and the current location of the monitoring station (High School in Estarreja).

To achieve the proposed goals, numerical modeling was used by the VADIS CFD model. The simulations were applied on two pollutants, NO_x and PM₁₀, and for these pollutants the sources accounted are considered representative of the municipality of Estarreja. In order to evaluate the influence of the meteorological conditions on the air quality of the region, we used the data obtained in the measurement tower of the University of Aveiro and chose, based on their frequency, to simulate with winds for the velocities 2 and 5 m.s⁻¹ of NNW and SE directions. These directions are the most frequent for the second and fourth quadrant.

Based on the results obtained by the simulations, it was possible to observe that the road with the main impact is EN109 and for NNW winds the pollutants are dragged causing a significant accumulation on the south of the domain mainly caused by vegetation and the existing buildings. However, the center of Estarreja is more affected by SE winds, in which we observe a large area of high concentration over the city. Concentrations were at maximum for the lowest wind speeds (2 m.s⁻¹).

In the detailed analysis of the old location in Estarreja-Teixugueira and the current location, it was noticed that for NNW winds the places chosen for the stations do not reflect the impact that the EN 109 has on the air quality of the region and for SE winds only the influence of the smaller surrounding roads is verified. This means that the measurements on those locations is not representative of the concentrations in the region.

Índice

Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	vii
Lista de acrónimos, abreviaturas e símbolos	ix
1. Introdução	1
1.1 Motivação e Objetivos	2
1.2 Metodologia	3
1.3 Estrutura do Trabalho	4
2. Enquadramento Legal	5
2.1 Diretiva Quadro da qualidade do ar	5
2.2 Poluentes, Fontes e Efeitos	7
3. Caracterização da CIRA	13
3.1 Caracterização Geral	13
3.2 Mobilidade e Transportes	13
3.3 Caracterização Económica	16
3.4 Fontes e emissão de poluentes	18
3.4.1 Indústria	18
3.4.2 Agricultura	19
3.5 Caracterização Climatológica	19
3.5.1 Temperatura.....	21
3.5.2 Precipitação e Humidade	22
3.5.3 Vento	22
3.5.4 Radiação Global.....	24
4. Metodologia de Avaliação da Qualidade do Ar na Região de Aveiro	25
4.1 Rede de Monitorização da Qualidade do Ar na Região de Aveiro	25
4.2 Modelação da Qualidade do Ar.....	28
4.2.1 Modelo CFD VADIS	29
4.2.2 Domínio de Simulação.....	34
5. Resultados	39
5.1 Avaliação dos Dados de Monitorização da Qualidade do Ar	40
5.2 Análise do Escoamento Atmosférico.....	44
5.3 Emissões.....	52
5.3.1 Tráfego Rodoviário	52

5.3.2 Indústria	58
5.4 Padrões de dispersão de poluentes	60
6. Conclusão.....	77
Referências Bibliográficas	81
Anexos	A-1
Anexo A	A-1
Anexo B	A-2
Anexo C.....	A-5
Anexo D	A-9
Anexo E.....	A-11

Lista de Figuras

Figura 1- Esquema relativo à legislação comunitária e a sua transposição para a legislação nacional sobre a qualidade do ar.....	6
Figura 2- Vista aérea dos incêndios que ocorrerem a 17 de junho de 2017 na região Centro de Portugal [URL3].	9
Figura 3- Mapa dos municípios que constituem a região de Aveiro [URL4].	13
Figura 4- Valores para 2011 da percentagem de fluxos totais inter-regional (a); Destinos e fluxos totais intermunicipais (b) [Fonte:CIRA, 2014].	15
Figura 5- Rede viária e áreas comerciais da região de Aveiro [CIRA, 2014].	16
Figura 6- Classificação climática de Köppen-Geiger na Península Ibérica [Chazarra et al., 2011]. ...	20
Figura 7- Temperatura média anual [Fonte: SNIAmb].	21
Figura 8- Precipitação média anual [Fonte: SNIAmb].	22
Figura 9 - Velocidade e direção média anual do vento no período 2006-2013, em Aveiro [Sorte et al., 2018].	23
Figura 10- Radiação solar média anual [Fonte: SNIAmb].	24
Figura 11- Localização das Estações de Monitorização da Qualidade do Ar na Região de Aveiro, em que a EMQA 1 é a estação de fundo de Estarreja, a EMQA 2 é a estação de tráfego de Aveiro e a EMQA 3 é a estação de fundo de Ílhavo.	26
Figura 12- Representação esquemática dos dados de entrada e saída para os módulos FLOW e DISPER [Borrego et al.,2003].	30
Figura 13- Esquema das malhas de campo de vento e cartográfica [Costa, 2003].	31
Figura 14- Localização dos obstáculos e fontes emissoras na malha cartográfica [Costa, 2003]. ...	33
Figura 15- Esquema dos dados de entrada para as simulações com o modelo VADIS.	33
Figura 16- Domínio de simulação D1 processado em ArcGIS.	35
Figura 17- Domínio de simulação D2 processado em ArcGIS	36
Figura 18- Representação tridimensional da atual localização da EMQA na Escola Secundária de Estarreja.	37
Figura 19- Representação tridimensional da antiga localização da EMQA em Estarreja- Teixugueira.	37
Figura 20- Contribuição por setor para o concelho de Estarreja no ano 2015 para NO _x e PM ₁₀	39
Figura 21- Evolução do perfil diário das médias horárias de NO _x e PM ₁₀ , durante os anos 2014-2016, para as estações de Aveiro, Estarreja e Ílhavo.	41
Figura 22- Concentração média diária de PM ₁₀ em 2016 na estação de monitorização de Estarreja.	42
Figura 23- Comparação entre a média anual (a) e o número de dias excedidos do valor limite diário (b) de PM ₁₀ para as estações da região de Aveiro entre os anos 2012 e 2016.	42
Figura 24- Comparação entre a média anual de NO ₂ para as estações da região de Aveiro entre os anos 2012 e 2016.	43
Figura 25- Representação do campo de ventos para condições iniciais de vento com direção de NNW e velocidade de 2 m.s ⁻¹ sob o domínio D1.	45
Figura 26- Representação do campo de ventos para condições iniciais de vento com direção de NNW e velocidade de 5 m.s ⁻¹ sob o domínio D1.	45
Figura 27- Representação do campo de ventos para condições iniciais de vento com direção de SE e velocidade de 2 m.s ⁻¹ sob o domínio D1.	46
Figura 28-Representação do campo de ventos para condições iniciais de vento com direção de SE e velocidade de 5 m.s ⁻¹ sob o domínio D1.	47
Figura 29- Representação da direção do escoamento para condições iniciais de vento de NNW e intensidade de 5 m.s ⁻¹ na área de Estarreja-Teixugueira.	48

Figura 30- Representação dos ventos (com diferentes direções e intensidades) na zona da antiga estação de Estarreja-Teixugueira.	49
Figura 31-Representação da direção do escoamento para condições iniciais de vento de NNW e intensidade de 5 m.s^{-1} na área da Escola Secundária.	50
Figura 32- Representação dos ventos (com diferentes direções e intensidades) na zona da estação da Escola Secundária de Estarreja.....	51
Figura 33- Esquema da metodologia estabelecida para obtenção dos dados de tráfego por segmento de via.	54
Figura 34- Mapa de Ruído do concelho de Estarreja de 2014.	55
Figura 35- Perfil diário de tráfego rodoviário num dia da semana.	55
Figura 36- Representação da taxa de emissões por via, em g/km, para NOx num período de intenso tráfego rodoviário (10h).	56
Figura 37-Representação da taxa de emissões por via, em g/km, para PM ₁₀ num período de intenso tráfego rodoviário (10h).	57
Figura 38- Localização geográfica do Complexo Químico de Estarreja.....	58
Figura 39- Representação do padrão de dispersão de NO ₂ , em concentração normalizada, para um período de baixas emissões (às 5h) para ventos de NNW com intensidade de 2 m.s^{-1}	61
Figura 40-Representação do padrão de dispersão de NO ₂ , em concentração normalizada, para um período de baixas emissões (às 5h) para ventos de NNW com intensidade de 5 m.s^{-1}	61
Figura 41- Representação do padrão de dispersão de NO ₂ , em concentração normalizada, para um período de elevadas emissões (às 10h) para ventos de NNW com intensidade de 2 m.s^{-1}	62
Figura 42- Representação do padrão de dispersão de NO ₂ , em concentração normalizada, para um período de elevadas emissões (às 10h) para ventos de NNW com intensidade de 5 m.s^{-1}	62
Figura 43-Representação do padrão de dispersão de NO ₂ , em concentração normalizada, para um período de baixas emissões (às 5h) para ventos de SE com intensidade de 2 m.s^{-1}	63
Figura 44- Representação do padrão de dispersão de NO ₂ , em concentração normalizada, para um período de baixas emissões (às 5h) para ventos de SE com intensidade de 5 m.s^{-1}	63
Figura 45- Representação do padrão de dispersão de NO ₂ , em concentração normalizada, para um período de elevadas emissões (às 10h) para ventos de SE com intensidade de 2 m.s^{-1}	64
Figura 46- Representação do padrão de dispersão de NO ₂ , em concentração normalizada, para um período de elevadas emissões (às 10h) para ventos de SE com intensidade de 5 m.s^{-1}	64
Figura 47- Representação do padrão de dispersão de PM ₁₀ em concentração normalizada, para um período de baixas emissões (às 5h) para ventos de NNW com intensidade de 2 m.s^{-1}	65
Figura 48- Representação do padrão de dispersão de PM ₁₀ , em concentração normalizada, para um período de baixas emissões (às 5h) para ventos de NNW com intensidade de 5 m.s^{-1}	65
Figura 49-Representação do padrão de dispersão de PM ₁₀ , em concentração normalizada, para um período de elevadas emissões (às 10h) para ventos de NNW com intensidade de 2 m.s^{-1}	66
Figura 50- Representação do padrão de dispersão de PM ₁₀ , em concentração normalizada, para um período de elevadas emissões (às 10h) para ventos de NNW com intensidade de 5 m.s^{-1}	66
Figura 51-Representação do padrão de dispersão de PM ₁₀ , em concentração normalizada, para um período de baixas emissões (às 5h) para ventos de SE com intensidade de 2 m.s^{-1}	67
Figura 52- Representação do padrão de dispersão de PM ₁₀ , em concentração normalizada, para um período de baixas emissões (às 5h) para ventos de SE com intensidade de 5 m.s^{-1}	67
Figura 53- Representação do padrão de dispersão de PM ₁₀ , em concentração normalizada, para um período de elevadas emissões (às 10h) para ventos de SE com intensidade de 2 m.s^{-1}	68
Figura 54- Representação do padrão de dispersão de PM ₁₀ , em concentração normalizada, para um período de elevadas emissões (às 10h) para ventos de SE com intensidade de 5 m.s^{-1}	68
Figura 55- Representação do padrão de dispersão de NO ₂ , em concentração normalizada, no domínio da região de Estarreja-Teixugueira para um período de elevadas emissões para ventos de SE com intensidade de 2 m.s^{-1}	69

Figura 56- Representação do padrão de dispersão de NO ₂ , em concentração normalizada, no domínio da região da Escola Secundária para um período de elevadas emissões para ventos de SE com intensidade de 2 m.s ⁻¹ .	70
Figura 57- Representação do padrão de dispersão de PM ₁₀ , em concentração normalizada, no domínio da região de Estarreja-Teixugueira para um período de elevadas emissões para ventos de SE com intensidade de 2 m.s ⁻¹ .	71
Figura 58- Representação do padrão de dispersão de PM ₁₀ , em concentração normalizada, no domínio da região da Escola Secundária para um período de elevadas emissões para ventos de SE com intensidade de 2 m.s ⁻¹ .	71
Figura 59- Representação do padrão de dispersão de NO ₂ , em concentração normalizada, no domínio da região de Estarreja-Teixugueira para um período de elevadas emissões para ventos de NNW com intensidade de 2 m.s ⁻¹ .	72
Figura 60- Representação do padrão de dispersão de NO ₂ , em concentração normalizada, no domínio da região da Escola Secundária para um período de elevadas emissões para ventos de NNW com intensidade de 2 m.s ⁻¹ .	73
Figura 61- Representação do padrão de dispersão de PM ₁₀ , em concentração normalizada, no domínio da região de Estarreja-Teixugueira para um período de elevadas emissões para ventos de NNW com intensidade de 2 m.s ⁻¹ .	74
Figura 62- Representação do padrão de dispersão de PM ₁₀ , em concentração normalizada, no domínio da região da Escola Secundária para um período de elevadas emissões para ventos de NNW com intensidade de 2 m.s ⁻¹ .	74
Figura 63- Representação do padrão de dispersão de NO ₂ , em concentração normalizada, para o domínio D2 para ventos de NNW com intensidade de 5 m.s ⁻¹ .	75
Figura 64- Representação do padrão de dispersão de PM ₁₀ , em concentração normalizada, para o domínio D2 para ventos de NNW com intensidade de 5 m.s ⁻¹ .	76
Figura 65- Localização das regiões estudadas das EMQA no domínio D1: a) Estarreja-Teixugueira e em b) Escola Secundária.	1
Figura 66- Representação da direção do escoamento para vento de NNW e intensidade de 5m.s ⁻¹ para a área da Teixugueira.	2
Figura 67- Representação da direção do escoamento para vento de SE e intensidade de 2m.s ⁻¹ para a área da Teixugueira.	2
Figura 68- Representação da direção do escoamento para vento de SE e intensidade de 5m.s ⁻¹ para a área da Teixugueira.	3
Figura 69- Representação da direção do escoamento para vento de NNW e intensidade de 2m.s ⁻¹ para a área da Escola Secundária.	3
Figura 70- Representação da direção do escoamento para vento de SE e intensidade de 2m.s ⁻¹ para a área da Escola Secundária.	4
Figura 71- Representação da direção do escoamento para vento de SE e intensidade de 5m.s ⁻¹ para a área da Escola Secundária.	4
Figura 72- Representação da taxa de emissão por via, em g/km, para NO ₂ num período de baixo tráfego rodoviário (5h).	9
Figura 73- Representação da taxa de emissões por via, em g/km, para PM ₁₀ num período de baixo tráfego rodoviário (5h).	9
Figura 74- Diferença entre a taxa de emissão para o período de tráfego elevado e baixo por via, em g/km, para NO _x .	10
Figura 75- Diferença entre a taxa de emissão para o período de tráfego elevado e baixo por via, em g/km, para PM ₁₀ .	10
Figura 76- Representação da direção do escoamento no domínio da Escola Secundária de Estarreja para vento de SE e intensidade de 2 m.s ⁻¹ .	11

Figura 77- Representação do campo de ventos no domínio da Escola Secundária de Estarreja para vento de SE e intensidade de 2 m.s^{-1}	11
Figura 78- Representação da direção do escoamento no domínio de Teixugueira-Estarreja para vento de SE e intensidade de 2 m.s^{-1}	12
Figura 79- Representação do campo de ventos no domínio de Teixugueira-Estarreja para vento de SE e intensidade de 2 m.s^{-1}	12
Figura 80- Representação da direção do escoamento no domínio da Escola Secundária de Estarreja para vento de NNW e intensidade de 2 m.s^{-1}	12
Figura 81- Representação do campo de ventos no domínio da Escola Secundária de Estarreja para vento de NNW e intensidade de 2 m.s^{-1}	12
Figura 82- Representação da direção do escoamento no domínio de Teixugueira-Estarreja para vento de NNW e intensidade de 2 m.s^{-1}	12
Figura 83- Representação do campo de ventos no domínio de Teixugueira-Estarreja para vento de NNW e intensidade de 2 m.s^{-1}	12

Lista de Tabelas

Tabela 1- Valores limite por poluente para a proteção da saúde humana [Adaptado do Decreto-Lei n.º 102/2010].	7
Tabela 2- Fontes de emissão, impactos na qualidade do ar e efeitos dos principais poluentes atmosféricos [adaptado: CEC, 2005].	8
Tabela 3- Proporção, em percentagem, para 2011 da população residente que entra e sai da unidade territorial na região de Aveiro e a proporção de utilização automóvel nos deslocamentos.	14
Tabela 4- Estações de monitorização da qualidade do ar na região de Aveiro em 2018 [Fonte: QualAr]	26
Tabela 5- Classificação das estações de acordo com o ambiente envolvente e por fonte de emissão predominante [APA, 2015].	27
Tabela 6- Poluentes monitorizados em 2018 na Aglomeração de Aveiro/Ílhavo e em Estarreja [Fonte: QualAr].	28
Tabela 7- Emissões por setor de NOx e PM10, em kt, para o ano de 2015 para o concelho de Estarreja.	40
Tabela 8- Valores de intensidade do vento simulados, em m/s, na localização antiga e atual da EMQA para diferentes condições iniciais de entrada.	52
Tabela 9- Emissões de Partículas e Óxidos de Azoto por empresa para o ano de 2015 e 2016 [Fonte: PACOPAR, 2016].	59

Lista de acrónimos, abreviaturas e símbolos

APA	Associação Portuguesa do Ambiente
BaP	Benzo(a)pireno
C ₆ H ₆	Benzeno
CCDR	Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional
CCDRC	Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics)
CH ₄	Metano
CICI	Compostos Inorgânicos Clorados
CIF	Compostos Inorgânicos Fluorados
CIRA	Comunidade Intermunicipal da Região de Aveiro
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
COV	Compostos orgânicos voláteis
COVNM	Compostos orgânicos voláteis não metânicos
CQE	Complexo Químico de Estarreja
DQ	Diretiva-Quadro
ECE	Comunidade Económica Europeia (Economic Commission for Europe)
EEA	Agência Europeia do Ambiente (European Environment Agency)
EIDT	Estratégia Integrada de Desenvolvimento Territorial
EMA	Estação Meteorológica Automática
EMQA	Estação de Monitorização da Qualidade do Ar
EN 109	Estrada Nacional 109
g	Aceleração da gravidade
G _k	Produção de energia cinética turbulenta
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogénio
ICNF	Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas
IDAD	Instituto do Ambiente e Desenvolvimento
INE	Instituto Nacional de Estatística
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
k	Energia cinética turbulenta
MPT	Metais Pesados Totais
N	Norte
NH ₃	Amoníaco
NNW	Nor-Noroeste
NO	Monóxido de azoto
NO ₂	Dióxido de azoto
NUT	Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos
NW	Noroeste
O ₃	Ozono
OMS	Organização Mundial de Saúde (World Health Organization)
P	Pressão

PACOPAR	Painel Consultivo Comunitário do Programa Atuação Responsável de Estarreja
Pb	Chumbo
PIB	Produto Interno Bruto
PM ₁₀	Material particulado com diâmetro inferior a 10µm
PM _{2,5}	Material particulado com diâmetro inferior 2,5µm
ppb	Parte por bilião
Ri	Número de Richardson
S	Sul
SAU	Superfície Agrícola Utilizada
SE	Sudeste
SO ₂	Dióxido de enxofre
S _u	Termo fonte
T	Temperatura
TREM	Transport Emission Model for Line Sources
UE	União Europeia
u _i	Velocidade
UN	Nações Unidas (United Nations)
UNECE	Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa (United Nations Economic Commission for Europe)
VAB	Valor Acrescentado Bruto
VADIS	Pollutant dispersion in the atmosphere under variable wind conditions
ε	Dissipação viscosa
μ	Viscosidade dinâmica
ρ	Densidade do ar
u _t	Difusividade turbulenta
ν _e	Viscosidade efetiva

1. Introdução

Em 2016, estimava-se que 54,4% da população mundial vivia em zonas urbanas, da qual, 1,7 mil milhões de pessoas (23% da população mundial) viviam numa cidade com pelo menos 1 milhão de habitantes. As projeções indicam que em 2030 este valor aumentará, aproximando-se dos 27% [UN, 2016]. O rápido crescimento demográfico acompanhado pela urbanização intensa provoca um acentuado consumo energético e de recursos, de forma a dar resposta às necessidades dos variados sectores, tais como, doméstico, industrial, de serviços e transportes. Como consequência inevitável, surge a produção de grandes quantidades de resíduos e emissões que causam grandes pressões sobre o meio ambiente. A degradação da qualidade do ar nos centros urbanos surge como uma das mais relevantes pressões ambientais [Silva, 2010].

O conceito de qualidade do ar exterior está relacionado com o nível de concentração de poluentes atmosféricos na camada inferior da atmosfera, a troposfera. Estas alterações repercutem-se negativamente na saúde pública e no bem-estar das populações, exercendo também uma influência nefasta na fauna e na flora [CCDRC, 2010].

A poluição atmosférica pode ser definida como uma alteração da composição química natural da atmosfera. Efetivamente, um poluente atmosférico é qualquer substância presente no ar ambiente que possa ter efeitos nocivos na saúde humana ou no ambiente. Os poluentes podem ser emitidos por fontes antropogénicas ou naturais, podendo também ser classificados quanto à sua origem, em poluentes primários ou secundários. Os poluentes primários são aqueles que são emitidos diretamente pelas fontes para a atmosfera, enquanto os poluentes secundários resultam de reações químicas que ocorrem na atmosfera entre poluentes primários, como por exemplo a formação de ozono troposférico (O_3). Os poluentes secundários podem ser transportados ou formados a longas distâncias da sua fonte, o que pode afetar grandes áreas, sendo neste caso considerados como um problema de poluição atmosférica transfronteiriça [APA, 2015; Clara, 2013; CCDRC, 2017; EEA, 2017].

Compreender as tendências na urbanização nos próximos anos é crucial para implementar medidas eficientes e, com isto, fazer face a um problema que é tão determinante na saúde populacional. Ao longo dos anos, numerosos estudos têm feito associações entre a poluição do ar e uma vasta gama de efeitos nocivos na saúde. Os efeitos podem variar entre efeitos clínicos subtis até à morte prematura. Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), em 2014, 92% da população mundial vivia em locais onde os padrões da qualidade do ar (estabelecidos pela OMS) não foram atingidos. A poluição do ar, tanto nas cidades como em áreas rurais, estima-se causar 3 milhões de mortes em todo o mundo em 2012, sendo que as regiões do Pacífico Ocidental e o Sudeste Asiático foram as mais afetadas. Em conjunto, a poluição atmosférica interior e exterior causou cerca de 6,5 milhões de mortes (11,6% de todas as mortes globais) em 2012 [WHO, 2016a, 2017].

Em Portugal no ano de 2012, segundo a OMS morreram 1 769 pessoas de causas atribuíveis à poluição atmosférica [URL1]. No entanto, muito depende da exposição e vulnerabilidade da população, por exemplo, idosos, crianças, mulheres grávidas e pessoas com doenças subjacentes,

tal como a asma, estão mais em risco e podem desenvolver efeitos mais graves para a saúde mais rapidamente estando expostos a poluição do ar [WHO, 2016b].

O estudo de problemas associados à qualidade do ar a uma escala local exige a aplicação de uma metodologia adequada de forma a permitir compreender a relação entre a fonte e o recetor, e desenvolver uma estratégia adequada para reduzir a poluição atmosférica [Moussiopoulos et al., 2003; Borrego et al., 2003]. Uma melhor compreensão do microclima urbano e de todos os processos físicos e químicos envolvidos, requer não apenas medições precisas, mas também a utilização de técnicas de modelação numérica e física dos fluxos turbulentos no interior da camada limite atmosférica urbana [Rodrigues et al., 2018]. Atualmente existe uma vasta variedade de modelos numéricos disponíveis, os quais são distinguidos pelo tipo de fonte que consideram (fontes de emissão pontuais, em linha, em área ou em volume), os poluentes que permitem simular (poluentes passivos, poluentes secundários e correspondentes reações químicas), transformações químicas e mecanismos de remoção (tais como mecanismos de deposição de material particulado), distância do transporte e tempo médio de residência. Os modelos fornecem uma ferramenta com potencial para representar, com a maior exatidão possível, um sistema real [Vallero, 2008].

1.1 Motivação e Objetivos

O elevado número de complexos industriais presentes nos municípios da Comunidade Intermunicipal da Região de Aveiro (CIRA) potencia uma elevada pressão sobre a qualidade do ar e consequentemente na qualidade de vida da população residente. O município de Estarreja já foi alvo de diversos estudos principalmente devido à presença do complexo químico, infraestrutura esta que já levantou e continua a levantar inúmeras complicações e preocupações no seio da população de Estarreja e municípios vizinhos. Apesar de haver um esforço por parte das indústrias e do município para reduzir as emissões, que efetivamente têm vindo a reduzir ao longo dos anos, no entanto, ainda se registam episodicamente valores preocupantes para a população residente. Nomeadamente a nível de $PM_{2,5}$, as quais continuam a apresentar concentrações muito elevadas. Em 2015, em Estarreja registou-se uma média anual de $14,7 \mu g.m^{-3}$ (com base numa eficiência de recolha de resultados na ordem dos 78,1%), valor este abaixo dos $25 \mu g.m^{-3}$ legislados em Portugal, contudo bastante superior aos $10 \mu g.m^{-3}$ estabelecido pela Organização Mundial da Saúde. O valor estabelecido pela OMS visa preservar a saúde uma vez que este é o nível mais baixo dos quais a mortalidade total, cardiopulmonar e por cancro do pulmão demonstraram aumentar com mais de 95% de confiança em resposta à exposição prolongada a $PM_{2,5}$ [WHO, 2006].

A criação deste trabalho encontra-se ainda relacionado com a mudança da localização da estação de monitorização da qualidade do ar (EMQA), tendo mudado de Estarreja-Teixugueira para a Escola Secundária de Estarreja. A estação iniciou as medições na nova localização no início do ano de 2018 e aquando da mudança da localização ocorreu também a mudança de classificação do tipo de influência industrial para o tipo de influência de fundo.

Com isto, a elaboração deste trabalho surge em resposta a dois principais objetivos traçados: em que visa quantificar, recorrendo ao modelo CFD VADIS, o impacto do tráfego rodoviário nas concentrações de PM_{10} e de NO_x e avaliar a influência do Complexo Químico de Estarreja (CQE) na

região de Estarreja; e como segundo objetivo, avaliar e compreender as diferenças de escoamento atmosférico, assim como o tipo de influência das fontes de emissão e os níveis de concentração de poluentes medidos entre os locais em que se situou a antiga estação de monitorização da qualidade do ar de Estarreja-Teixugueira e a atual localização da estação junto à Escola Secundária de Estarreja.

1.2 Metodologia

De modo a atingir os objetivos propostos, a metodologia de trabalho desenvolvida envolve as seguintes fases. A primeira fase consistiu na pesquisa bibliográfica sobre a diretiva quadro da qualidade do ar, os poluentes, as fontes de emissão e os seus efeitos na qualidade do ar. Efetuaram-se igualmente pesquisas bibliográficas sobre trabalhos envolvendo o modelo CFD VADIS, assim como o seu modo de funcionamento, as suas potencialidades e limitações.

Para uma segunda fase procedeu-se ao estudo da região de Aveiro, região na qual se enquadra o município de Estarreja sendo esta a área de estudo. Prosseguiu-se então à caracterização da região de Aveiro a nível demográfico, económico, geográfico e climatológico.

Para a área de estudo foi necessário verificar os principais pontos de interesse, identificando as fontes de emissão e analisando os locais da EMQA. Em seguida, tornou-se necessário fazer o levantamento de toda a informação e dados relevantes para o trabalho. Recorreu-se ao relatório do PACOPAR de 2016 para fazer o levantamento das emissões pontuais do Complexo Químico de Estarreja e para o tráfego rodoviário foi necessário analisar os relatórios de ruído de 2009 e 2015 da Câmara Municipal de Estarreja, os relatórios do Instituto de Mobilidade e dos Transportes e para as vias que desproviavam de informação, recorreu-se a estimativas com base nos valores obtidos para outras vias semelhantes fazendo esta ligação assentando no conhecimento da região. Uma vez que a região da Escola Secundária de Estarreja se torna num importante foco neste trabalho, de modo a reduzir incertezas procedeu-se então à contagem do volume de tráfego por categoria para diversas horas em dias da semana. Sendo que estas foram efetuadas das 8h às 14h e das 16h às 19h.

Após a recolha da informação e do seu tratamento procedeu-se para uma terceira fase a qual consistiu na criação dos domínios de simulação em ArcGIS sendo necessário desenhar todos os edifícios, árvores e estradas. Definindo como atributo a altura de cada obstáculo. Com o intuito de dar resposta aos diversos objetivos criaram-se diversas áreas de estudo, a área principal denominada por domínio D1 a qual corresponde ao centro do município de Estarreja, dois subdomínios que correspondem ao local antigo da EMQA em Estarreja-Teixugueira e ao local atual da Escola Secundária de Estarreja e por fim ainda se definiu um domínio o qual compreende o domínio D1 e o CQE, que visa avaliar o impacto do CQE na cidade.

Com as áreas de estudo definidas, para compreender os fenómenos de dispersão dos poluentes e dar resposta aos objetivos propostos, recorreu-se à utilização de um modelo da computação da dinâmica de fluidos (modelos CFD), o modelo VADIS. As coordenadas e alturas dos obstáculos e estradas foram corridas com um pré-processador de modo a ser preparado um ficheiro de entrada para o modelo VADIS. Sendo este modelo constituído por dois módulos, foi necessário

correr o módulo FLOW para obter o campo de ventos de acordo com a intensidade e direção do vento pretendida, e numa segunda fase, correr o módulo DISPER para obter os padrões de dispersão. Os ficheiros de saída das concentrações foram representados por um software de cálculo numérico no qual se recorreu ao Matlab.

Por fim, com vista a dar resposta aos objetivos propostos, a última fase consistiu em interpretar e comparar os resultados obtidos para as diferentes áreas de estudo e para diferentes condições iniciais de ventos. Com isto, foi possível verificar as zonas mais afetadas pelo tráfego rodoviário, observar a pluma libertada pelo CQE e identificar as diferenças entre escoamentos atmosféricos, concentrações registadas e tipos de influências do tráfego rodoviário nos locais da EMQA.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho desenvolvido encontra-se dividido em seis capítulos. O presente capítulo surge como um enquadramento geral, na qual é contextualizada a problemática do tema e a sua importância. Definindo a motivação e objetivos do presente trabalho, a metodologia adotada e ainda a descrição da estrutura do trabalho.

No capítulo 2 surge o enquadramento legal, no qual é feita uma explicação da diretiva quadro da qualidade do ar e a sua transposição para a legislação nacional, havendo igualmente uma referência aos valores limites estipulados pelo Decreto-Lei atualmente em vigor, assim como uma explicação dos poluentes abrangidos pelo mesmo e os seus efeitos na saúde.

O capítulo 3 surge como um capítulo de caracterização da região de Aveiro. Sendo feita uma caracterização mais abrangida nos municípios que constituem a CIRA assim como uma caracterização económica e também climatológica.

No capítulo 4 são apresentadas metodologias para avaliar a qualidade do ar na região de Aveiro na qual incide sobre as estações de monitorização da qualidade do ar presentes na região e no enquadramento da modelação da qualidade do ar. Neste capítulo é ainda descrito o modelo utilizado neste trabalho o modelo CFD VADIS, descrevendo particularmente os módulos que o constituem: FLOW e DISPER. Apresenta-se ainda os diferentes domínios de simulação desenvolvidos, nomeadamente o domínio do centro da cidade de Estarreja (D1), o domínio D2 o qual engloba o domínio D1 e o Complexo Químico de Estarreja, e ainda os domínios de ambas as localizações, a localização antiga de Estarreja-Teixugueira e a localização atual da Escola Secundária de Estarreja, da EMQA.

O capítulo 5 foca-se nos valores medidos pelas estações de monitorização, apresenta os escoamentos dos ventos, as emissões do tráfego rodoviário e da indústria, assim como os padrões de dispersão resultantes para os poluentes NO_2 e PM_{10} .

O capítulo 6 inclui as principais conclusões obtidas neste trabalho, as limitações na elaboração da dissertação e algumas considerações finais relativas ao caso de estudo e aos resultados alcançados.

2. Enquadramento Legal

A sociedade está cada vez mais consciente dos efeitos negativos associados à degradação da qualidade do ar. De tal forma, que o governo reconhece que a política do ambiente constitui um elemento estruturante da estratégia de desenvolvimento sustentável do país e da qualidade de vida dos cidadãos. Assim torna-se essencial adotar várias medidas legislativas sobre a qualidade do ar e outros planos de intervenção de modo a controlar e reduzir os efeitos dos poluentes atmosféricos, a fim de proteger a saúde humana e o ambiente na sua globalidade. Várias dessas estratégias consistem em combater as emissões de poluentes na origem e o desenvolvimento e implementação de medidas mais eficazes com o intuito de reduzir emissões em zonas ou aglomerações, cujos níveis de poluentes no ar ambiente excedam o valor limite a nível local, nacional e comunitário. Deste modo, deverão ser evitadas, prevenidas ou reduzidas as emissões de poluentes atmosféricos, fixando objetivos adequados para a qualidade do ar ambiente tendo em conta as normas, orientações e programas da Organização Mundial da Saúde [CCDRC, 2010; Diretiva 2008/50/CE; Decreto-Lei n.º 102/2010].

2.1 Diretiva Quadro da qualidade do ar

Em 1996, foi aprovada pela União Europeia a Diretiva 1996/62/CE, designada por Diretiva Quadro (DQ) da qualidade do ar, relativa à avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente que veio definir um novo quadro legislativo, impondo uma nova linha de orientação estratégica política a ser cumprida por todos os Estados-Membros. Um dos principais objetivos introduzidos pela Diretiva-Quadro (DQ) assenta na definição de objetivos para a qualidade do ar de modo a evitar, prevenir ou limitar efeitos nocivos sobre a saúde humana e sobre o ambiente na sua globalidade. Em Portugal, esta diretiva foi transposta para a ordem jurídica interna através do Decreto-Lei n.º 276/99, de 23 de julho, tendo sido posteriormente alterada para o Decreto-Lei n.º 279/2007, de 6 de agosto.

Posteriormente à DQ, surgiu a criação de quatro diretivas-filhas (1999/30/CE, de 22 de abril, 2000/69/CE, de 16 de novembro, 2002/3/CE, de 12 de fevereiro e 2004/107/CE, de 15 de dezembro). As duas primeiras foram transpostas para o direito nacional pelo Decreto-Lei n.º 111/2002, de 16 de abril, com vista a estabelecer, relativamente à proteção da saúde humana, valores limite com as respetivas margens de tolerância para os poluentes SO₂, NO₂, NO_x, PM₁₀, Pb (na Diretiva 99/30/CE, de 22 de abril), C₆H₆ e CO (na Diretiva 2000/69/CE). A Diretiva 2002/3/CE, de 12 de fevereiro, transposta para o direito interno pelo Decreto-Lei n.º 320/2003, de 20 de dezembro, estabeleceu valores alvo e objetivos de longo prazo para o O₃ relativos à proteção da saúde humana e ecossistemas, assim como um limiar de alerta e um limiar de informação ao público. A 4ª Diretiva-filha, 2004/107/CE, transposta para o direito nacional pelo Decreto-lei n.º 351/2007, de 31 de outubro, veio estabelecer valores alvo para as concentrações médias anuais de arsénio, cádmio, níquel e benzo(a)pireno, tendo de igual forma determinado métodos e técnicas para avaliar concentrações e deposição para estas substâncias.

Em 2008, surgiu a Diretiva 2008/50/CE de 21 de maio de 2008 relativa à qualidade do ar ambiente e a um ar mais limpo na Europa. Esta diretiva veio agregar num único ato legislativo as

disposições legais da Diretiva 96/62/CE, de 27 de setembro, e das três primeiras diretivas filhas (Diretivas 1999/30/CE, de 22 de abril, 2000/69/CE, de 16 de novembro e 2002/3/CE, de 12 fevereiro).

Foram transpostas, do Parlamento Europeu e do Conselho para a ordem jurídica Portuguesa, pelo Decreto-Lei n.º 102/2010, de 23 de setembro, as seguintes diretivas: a Diretiva n.º 2008/50/CE, de 21 de maio, relativa à qualidade do ar ambiente e a um ar mais limpo na Europa; e a Diretiva n.º 2004/107/CE, de 15 de dezembro, relativa ao arsénio, ao cádmio, ao mercúrio, ao níquel e aos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos no ar ambiente. Este decreto-lei veio fixar os objetivos para a qualidade do ar ambiente tendo em conta as normas, as orientações e os programas da Organização Mundial da Saúde definindo valores limite, valores alvo e valores limiar de alerta para os diversos poluentes, estabelecendo também linhas de orientação da política nacional da gestão da qualidade do ar ambiente, assim como as exigências relativas à monitorização e previsão da concentração de certos poluentes, bem como os planos de ação que devem ser concebidos para melhorar a qualidade do ar a curto e longo prazo [Decreto-Lei n.º 102/2010, de 23 de setembro].

O Decreto-Lei n.º 102/2010, de 23 de setembro, foi alterado pelo Decreto-Lei nº 43/2015, de 27 de março sendo, até à data, o documento legal em vigor [URL2]. A Figura 1 apresenta a diretiva quadro da qualidade do ar e a sua transposição para a legislação nacional.

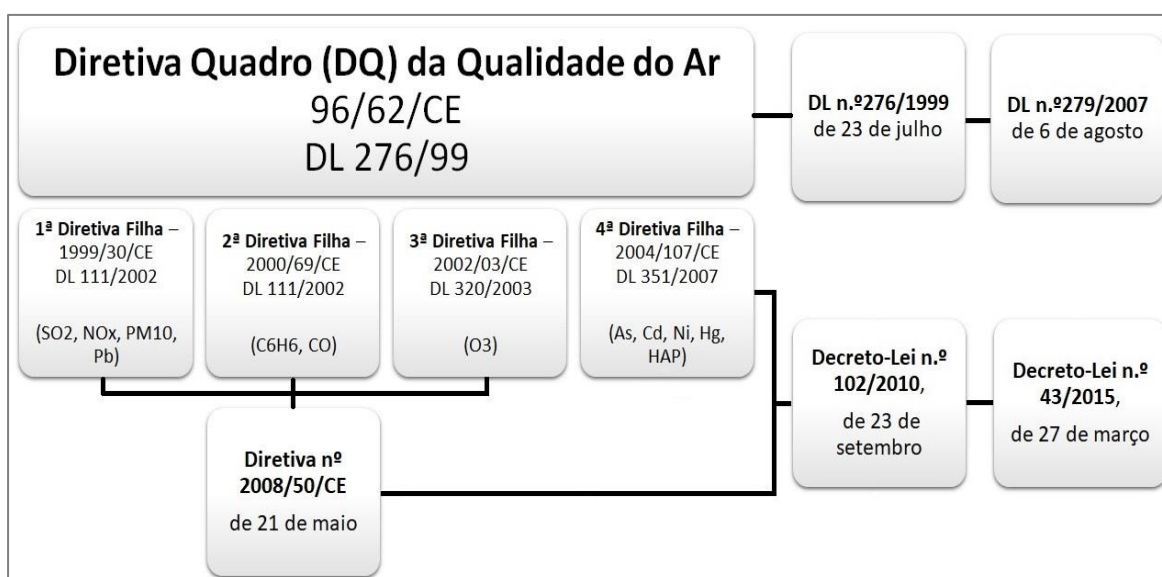


Figura 1- Esquema relativo à legislação comunitária e a sua transposição para a legislação nacional sobre a qualidade do ar.

O Valor Limite corresponde a um nível fixado com base em conhecimento científico com o intuito de evitar, prevenir ou reduzir os efeitos nocivos na saúde humana e ou no ambiente, a atingir num prazo determinado e que, quando atingido, não deve ser excedido, enquanto o Valor Alvo é um nível fixado com o intuito de evitar, prevenir ou reduzir os efeitos nocivos na saúde humana e ou no ambiente, a atingir, na medida do possível, durante um determinado período de tempo [Decreto-Lei n.º 102/2010, de 23 de setembro].

Tabela 1- Valores limite por poluente para a proteção da saúde humana [Adaptado do Decreto-Lei n.º 102/2010].

Poluente	Período de referência	Valor Limite	Número de excedências permitidas por ano civil
Dióxido de Enxofre (SO₂)	Horário	125 µg/m ³	3
	Diário	350 µg/m ³	24
Dióxido de Azoto (NO₂)	Horário	200 µg/m ³	18
	Anual ⁽¹⁾	40 µg/m ³	-
Benzeno (C₆H₆)	Anual	5 µg/m ³	-
Monóxido de Carbono (CO)	Máximo diário das médias octo-horárias ⁽²⁾	10 mg/m ³	-
Chumbo (PB)	Anual	0,5 µg/m ³	-
PM₁₀	Diário	50 µg/m ³	-
	Anual	40 µg/m ³	35

(1) O período de referência anual tem como base o ano civil.

(2) O valor máximo diário das médias octo-horárias é selecionado com base nas médias obtidas por períodos de oito horas consecutivas, calculadas a partir dos dados horários e atualizadas de hora a hora. Cada média por período de oito horas calculada desta forma é atribuída ao dia em que termina; desta forma, o primeiro período de cálculo de um dia tem início às 17 horas do dia anterior e termina à 1 hora do dia em causa; o último período de cálculo de um dia tem início às 16 horas e termina às 24 horas do mesmo dia.

2.2 Poluentes, Fontes e Efeitos

Os poluentes atmosféricos abrangidos pela diretiva em vigor podem ser de origem antropogénica, natural ou ainda de origem mista. As concentrações dos poluentes no ar ambiente dependem essencialmente de três fatores: morfologia do terreno, quantidades emitidas e condições meteorológicas que condicionam a sua dispersão e as suas reações. Assim, será feita uma avaliação das fontes de dióxido de enxofre, óxidos de azoto, monóxido de carbono, benzeno, partículas e ozono.

Tabela 2- Fontes de emissão, impactos na qualidade do ar e efeitos dos principais poluentes atmosféricos [adaptado: CEC, 2005].

Poluente	Setor	Impacto na qualidade do ar	Efeitos
SO₂	Transporte Geração de energia Doméstico Indústria	Aumento das concentrações de PM; Deposição ácida;	Saúde Natureza/Biodiversidade Materiais
PM	Transporte Geração de energia Doméstico Agricultura Indústria	Aumento das concentrações de PM;	Saúde
NH₃	Agricultura Indústria	Aumento das concentrações de PM; Deposição ácida Eutrofização	Saúde Natureza/Biodiversidade Materiais
NO_x	Transporte Geração de energia Doméstico Indústria	Aumento das concentrações de PM; Deposição ácida Eutrofização Aumento de Ozono troposférico	Saúde Natureza/Biodiversidade Materiais Colheitas
COV	Transporte Doméstico Indústria	Aumento de Ozono troposférico	Saúde Natureza/Biodiversidade Materiais Colheitas

As principais fontes poluidoras, são de origem antropogénica e destacam-se: em áreas urbanas, o tráfego automóvel como fonte do dióxido de azoto, monóxido de carbono, partículas em suspensão, benzeno e outros compostos orgânicos voláteis (COV); e as fontes industriais, no que diz respeito ao dióxido de enxofre, óxidos de azoto e partículas em suspensão [APA, 2008]. As fontes podem ser classificadas quanto à natureza das emissões, podendo estas ser fontes pontuais, fontes em linha ou em área (emissões difusas) [IDAD, 2002].

O dióxido de enxofre (SO₂) é um poluente atmosférico que provém essencialmente da combustão de carvão e de combustíveis derivados do petróleo. No processo de combustão o enxofre combina-se com o oxigénio atmosférico dando origem ao SO₂, o qual, na presença da humidade atmosférica se transforma em ácido sulfúrico (H₂SO₄). Os vulcões são uma fonte natural que tem uma contribuição relevante para as emissões deste poluente [APA, 2008; CCDRC, 2010, 2017; CEC, 2005].

Os óxidos de azoto (NO_x) resultam principalmente dos processos de combustão, sendo estes provenientes quer de fontes estacionários quer de fontes móveis. O maior contribuidor das emissões totais de NO_x é o setor rodoviário, no entanto, existem também emissões de origem natural por exemplo, provenientes de vulcões e trovoadas. O NO corresponde à maior parte das emissões de NO_x, sendo posteriormente oxidado para formar NO₂, embora este seja também

diretamente emitido. A proporção de NO_2 (relação $\text{NO}_2 / \text{NO}_x$) emitido por veículo é consideravelmente mais elevada nos veículos a gasóleo do que a gasolina pois os seus sistemas de pós-tratamento de gases aumentam a oxidação do NO gerando emissões diretas de NO_2 [EEA, 2017]. Estes poluentes contribuem para a acidificação dos lagos, rios e outros ecossistemas, provocando a perda de fauna e flora [APA, 2008; CCDRC, 2010, 2017; CEC, 2005].

O monóxido de carbono (CO) resulta da combustão incompleta, nomeadamente da combustão de biomassa nas lareiras, veículos automóveis e motores de combustão interna, sendo, nas grandes cidades o poluente mais abundante. A sua concentração diminui rapidamente com o aumento da distância às fontes de emissão. Ocorre também naturalmente de erupções vulcânicas e de fogos florestais. Em caso de exposição prolongada verificam-se dificuldades respiratórias que podem provocar mortes prematuras [APA, 2008; CCDRC, 2010, 2016].



Figura 2- Vista aérea dos incêndios que ocorreram a 17 de junho de 2017 na região Centro de Portugal [URL3].

As partículas finas de diâmetro aerodinâmico inferior a $10\mu\text{m}$ e $2,5\mu\text{m}$ (PM_{10} e $\text{PM}_{2.5}$) são emitidas para a atmosfera a partir de vastas fontes antropogénicas sendo as mais significativas, a queima de combustíveis fósseis, os processos industriais e o tráfego rodoviário, contudo existe também uma grande contribuição por fontes naturais, tais como transporte de partículas e incêndios. Em Portugal, a intrusão de massas de ar oriundas dos desertos do Norte de África são fenómenos muito frequentes, dada a proximidade entre as duas regiões. Outro acontecimento com grande peso nos valores de concentrações de matéria particulada em Portugal são os incêndios florestais, que devido à ação do vento pode também ser transportada a

grandes distâncias. Dado o elevado número de incêndios florestais registados nos últimos anos em território nacional, este é inequivocamente um fenómeno responsável por muitos dos cenários de concentrações elevadas de PM_{10} [APA, 2008; CCDRC, 2010, 2017; CEC, 2005]. Um exemplo marcante e atual (ocorreu a 16 de outubro de 2017), o qual foi alvo de cobertura de diversos meios de comunicação social, nacional e internacional, é referente ao céu de Londres ter apresentado um tom alaranjado. Este fenómeno resultou da combinação de três fatores, nomeadamente, os incêndios que ocorriam na Península Ibérica, as poeiras em suspensão vindas do Norte de África (Saara) e a passagem do furacão Ophelia sobre o Atlântico que arrastou as partículas, demonstrando assim a capacidade de dispersão das partículas.

As partículas microscópicas podem afetar a atividade respiratória, sendo mais crítico na população de risco como as crianças e idosos, e agravando o estado de saúde em pessoas que sofram de doenças cardiovasculares e pulmonares. O seu risco não depende tanto da sua concentração, mas sim de outros parâmetros como o seu tamanho e a sua toxicidade. Tal como os outros poluentes, as partículas provocam efeitos nocivos no sistema respiratório e cardiovascular, contudo as mais finas (emitidas predominantemente pelo tráfego rodoviário) por serem de menor

dimensão, como é o caso das $PM_{2,5}$, conseguem penetrar no sistema respiratório, tendo assim consequências mais graves em termos de saúde [APA, 2008; CCDRC, 2010, 2017; CEC, 2005].

Os efeitos mais graves para a saúde relacionados com a exposição a longo prazo a altos níveis de poluição do ar, incluem a redução da esperança média de vida da população em um ano ou mais, ou ainda a mortalidade [WHO, 2004]. As crianças são consideradas um grupo populacional particularmente vulnerável à poluição atmosférica, segundo a World Health Organization, está ligada a doenças e infeções que matam, por ano, cerca de 600 mil crianças com idade inferior a 5 anos [UNICEF, 2016]. Em Portugal, no âmbito do projeto SaudAr foi estudada a relação entre a poluição atmosférica e o agravamento da ocorrência e prevalência de asma nas crianças, numa área geográfica onde os problemas de qualidade do ar não fossem significativos, mas cujo elevado potencial de desenvolvimento pudesse vir a beneficiar da intervenção do estudo. “Em Portugal, Ferreira et al. (2009) reuniram dados de concentrações ambientais de partículas inaláveis e admissões hospitalares de crianças (0-15 anos) por motivo (doenças respiratórias e outros), evidenciando uma relação entre a ocorrência de doenças respiratórias e os níveis de partículas (bastante elevados na cidade de Lisboa) registados 3 dias antes da admissão do utente.” [Valente, 2011]. Outros estudos recentes mostraram que a prevalência de sintomas de bronquite em crianças e a função pulmonar reduzida em crianças e adultos estão associadas à exposição de partículas [WHO, 2000]. O papel da poluição atmosférica no desenvolvimento da asma é um assunto controverso. Contudo, sabe-se que as crianças que vivem em ambientes poluídos apresentam a função pulmonar diminuída, no entanto não se estabeleceu ainda uma relação clara com o desenvolvimento da asma [Valente, 2011].

O benzeno (C_6H_6) é um hidrocarboneto aromático que resulta de processos naturais, tal como em erupções vulcânicas, mas também de incêndios florestais; e de processos antropogénicos, sendo a fonte mais relevante, o tráfego rodoviário. O benzeno, quando inalado pode causar efeitos nocivos no fígado, na placenta e na medula óssea. Este poluente também está relacionado com a origem de leucemia, cancro da pele e do pulmão [APA, 2008; CCDRC, 2010].

Os compostos orgânicos voláteis (COV) são hidrocarbonetos resultantes da atividade antropogénica, como por exemplo, da queima de combustíveis e da utilização de solventes, presentes em tintas e vernizes. Naturalmente ocorre a emissão de COV no processo de fotossíntese da vegetação. Os COVs, na atmosfera aceleram a oxidação do NO a NO_2 , que, por sua vez reage na presença de radiação para formar ozono. As consequências levam à formação de ozono, que irá afetar a saúde humana e também a vegetação [CCDRC, 2010].

O ozono (O_3) troposférico é um poluente secundário pois não é diretamente emitido para a atmosfera, sendo formado a partir de reações químicas na presença de radiação ultravioleta, após emissões de gases precursores como o NO_x e COVNM (Compostos Orgânicos Voláteis não-metano) de origem natural e antropogénica. Os óxidos de azoto também esgotam o ozono troposférico devido à reação de titulação com o NO emitido para formar NO_2 e oxigénio [EEA, 2017; Klingberg et al., 2014]. A química da formação de O_3 requer fotólise e é mais rápida a temperaturas mais altas [Ainsworth et al., 2012].

O Ozono penetra profundamente nas vias respiratórias, afetando essencialmente os brônquios e os alvéolos pulmonares, fazendo a sua ação sentir-se mesmo em concentrações baixas

e em exposições de curta duração. Uma intoxicação aguda provoca uma reação inflamatória ao nível das mucosas respiratórias e agrava os sintomas de problemas respiratórios preexistentes. Este poluente também causa danos na vegetação, uma vez que afeta o seu crescimento, decresce a sua produtividade e também causa manchas nas folhas [APA, 2008; CCDRC, 2010, 2017].

A absorção de Ozono em excesso não só reduz o crescimento e a produtividade das culturas, como também altera a qualidade das culturas, sendo que a longo prazo pode também levar mudanças nas espécies e na composição genética das comunidades vegetais. No entanto, as incertezas nas projeções climáticas dificultam a caracterização dos riscos futuros de aumento de ozono [Fuhrer, 2009]. As concentrações de O_3 são consideravelmente superiores no Hemisfério Norte do que no Hemisfério Sul, apresentando uma média mensal, no Hemisfério Norte, variando de 35 a 50 ppb. Na América do Norte e na Europa, a maior concentração deste poluente ocorre no verão, com as concentrações diárias de pico a ocorrer no final da tarde. Atualmente, as concentrações de fundo de ozono na superfície são frequentes e suficientemente elevadas para reduzir o rendimento das principais culturas básicas, como arroz (*Oryza sativa*), trigo (*Triticum aestivum*), milho (*Zea mays*) e batata (*Solanum tuberosum*), representando assim um grande desafio para a população mundial [Ashmore 2005; Ashmore et al. 2006; Ainsworth et al., 2012].

A atualização regular das diretivas demonstra a preocupação e adaptabilidade às mudanças e desenvolvimentos científicos, caminhando assim num contexto de melhoria contínua de modo a dar resposta a todas as mutações que vão ocorrendo ao longo do tempo.

3. Caracterização da Região de Aveiro

3.1 Caracterização Geral

A região de Aveiro é unidade territorial estatística de nível III - NUT III parte da Região Centro que confronta a norte com a Área Metropolitana do Porto, a este com a região de Viseu Dão-Lafões, a sul com a região de Coimbra e a oeste com o Oceano Atlântico. A região é composta pelos concelhos de Águeda, Albergaria-a-Velha, Anadia, Aveiro, Estarreja, Ílhavo, Murtosa, Oliveira do Bairro, Ovar, Sever do Vouga e Vagos (Figura 3). Em 2015 entrou em vigor uma nova divisão regional em Portugal, sendo que o Douro e Vouga e o baixo Vouga dão origem à região de Aveiro. Assim, os municípios que se enquadram nesta região são os que constituem a CIRA.



Figura 3- Mapa dos municípios que constituem a região de Aveiro [URL4].

Segundo os dados do Instituto Nacional de Estatística (INE), a região de Aveiro tem uma área superficial de cerca de 1693 km² e uma população residente, em 2011, de 370 394 habitantes. Os municípios com maior dimensão populacional são Aveiro (78450), Ovar (55398) e Águeda (47729). Sendo que os municípios com menor população correspondem ao município de Murtosa (10585) e de Sever do Vouga (12356), estando relacionado com o facto de serem municípios fortemente rurais. A região de Aveiro apresenta assim uma densidade populacional média de 215,9 hab./km², valor este superior à média da NUTS II Região Centro (83,3 hab./km²) e de Portugal Continental (110,9 hab./km²). Contudo, à semelhança da tendência nacional e da zona centro, a região de Aveiro apresenta uma variação populacional em decréscimo na ordem dos 1,64% em 2016 relativamente a 2012. Sendo que desde 2002 se tem vindo a registar uma descida na população residente na região Centro.

3.2 Mobilidade e Transportes

Uma vez que o tráfego rodoviário é das principais influências na poluição do ar, então torna-se importante avaliar os movimentos pendulares da população nos municípios. Os movimentos pendulares correspondem aos movimentos efetuados pela população residente numa unidade territorial e que necessita de se deslocar devido ao estudo ou trabalho para uma outra unidade territorial. Assim, entender os hábitos da população torna-se uma ferramenta importante para a avaliação das fontes de emissão.

Tabela 3- *Proporção, em percentagem, para 2011 da população residente que entra e sai da unidade territorial na região de Aveiro e a proporção de utilização automóvel nos deslocamentos.*

	Mobilidade e transportes		
	Proporção da população residente que sai da unidade territorial (movimentos pendulares - censos)	Proporção da população residente que entra na unidade territorial (movimentos pendulares - censos)	Proporção de utilização do automóvel nas deslocações pendulares (movimentos pendulares - censos)
	2011	2011	2011
	%	%	%
Região de Aveiro	-	-	-
Águeda	11,73	13,30	74,8
Albergaria-a-Velha	19,60	13,84	72,8
Anadia	17,51	11,42	73,5
Aveiro	12,19	35,59	69,9
Estarreja	20,93	12,91	65,4
Ílhavo	23,87	9,69	69,0
Murtosa	21,41	8,40	54,8
Oliveira do Bairro	22,10	17,18	75,7
Ovar	18,77	13,16	64,2
Sever do Vouga	15,39	6,60	73,6
Vagos	22,87	9,72	71,8

Na Tabela 3 é possível observar a população residente estimada para a região de Aveiro e por município, assim como os movimentos pendulares de entrada e saída e a proporção de utilização de automóvel ligeiro nas deslocações pendulares. Estes dados caracterizam a dinâmica dos municípios, por exemplo, uma vez que o município de Aveiro possui uma vasta zona industrial e diversos estabelecimentos de ensino incita que as entradas de população não residente sejam superiores às saídas. A proporção de utilização do automóvel fornece dados sobre o impacto a nível de emissões relativamente ao tráfego rodoviário, podendo também fornecer informações sobre a eficiência dos transportes públicos dos municípios e outros dados de interesse para o município e a população residente.

Na Figura 4 encontra-se representado para 2011, em a) a percentagem de fluxos totais inter-regional e em b) os destinos e fluxos totais intermunicipais. Segundo o relatório da Estratégia Integrada de Desenvolvimento Territorial (EIDT) 2014-2020 realizado pela CIRA, verifica-se que os fluxos se estabelecem entre as NUTS III a norte da CIRA e o município de Ovar e entre o Baixo Mondego e os municípios localizados mais a sul da CIRA. A nível intermunicipal, o município de Aveiro apresenta-se como o principal recetor de mão de obra de outros municípios, destacando-se os municípios de Ílhavo, Albergaria-a-Velha, Águeda e Anadia. Águeda, Ílhavo e Ovar são municípios que também se destacam por serem recetores de muitos fluxos pendulares, incluindo do próprio município de Aveiro. Assim, conclui-se que existe uma forte correspondência entre os municípios criando uma grande dinâmica na região. Estes movimentos são impulsionados principalmente pela indústria transformadora [CIRA, 2014]. O conhecimento destes movimentos pendulares é essencial

para a estimativa das emissões associadas ao tráfego rodoviário, sendo estas essenciais para a compreensão dos padrões de qualidade do ar na região em estudo.

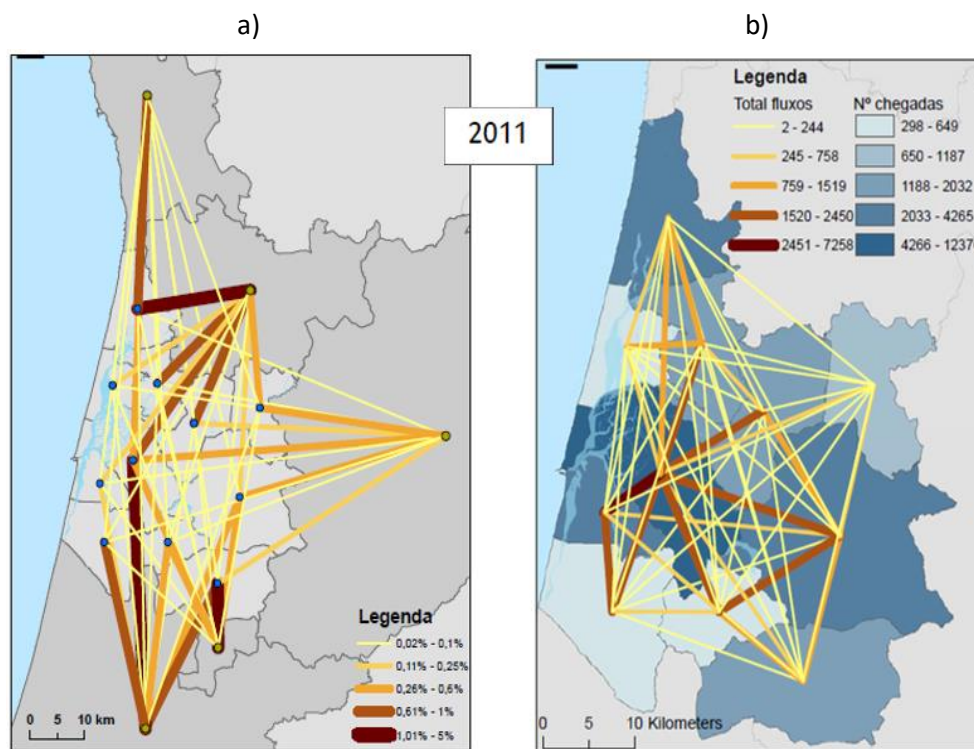


Figura 4- Valores para 2011 da percentagem de fluxos totais inter-regional (a); Destinos e fluxos totais intermunicipais (b) [Fonte:CIRA, 2014].

A região de Aveiro beneficia de uma boa localização geoestratégica, estando dotada das principais redes viárias nacionais rodoviárias e ferroviárias permitindo assim uma rápida ligação inter-regional e internacional. A região é servida por diversas autoestradas: a A1, a A17 e a A29 que atravessam a região de norte a sul e a A25 que atravessa de este a oeste. Estando também complementada por diversas estradas secundárias, tal como por exemplo, estradas nacionais que tem um grande impacto no tráfego rodoviário da região.

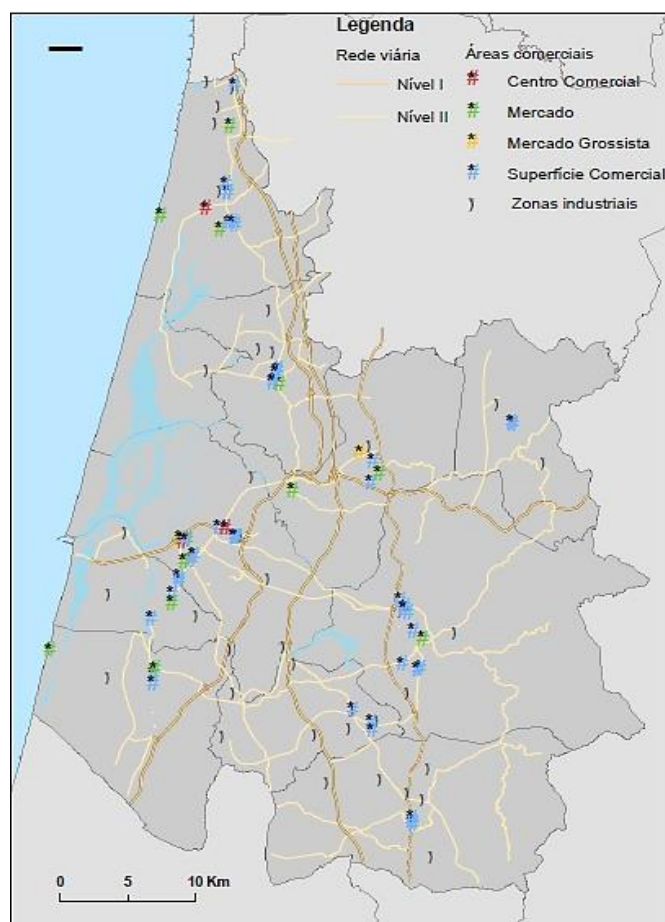


Figura 5- Rede viária e áreas comerciais da região de Aveiro [CIRA, 2014].

3.3 Caracterização Económica

No que diz respeito à atividade económica, o tecido produtivo da CIRA apresenta elevado grau de especialização na indústria transformadora, nomeadamente nos setores dos produtos químicos, minerais e metalúrgicos. A densidade de empresas na região de Aveiro, em 2016 era de 24,5 nº empresas/Km², valor bastante superior à Região Centro (12,1), onde se destacam os municípios de Ílhavo (52,2), Aveiro (47,7) e Ovar (38,6). O setor da pesca e da agricultura também detém um peso significativo no crescimento económico da região, bem como o tecido turístico que é promovido pela proximidade à ria de Aveiro. Na região de Aveiro, da população total empregada, 2,6% trabalha no setor primário, 38% no setor secundário e 59,4% no setor terciário.

As sub-regiões que constituem a região Centro apresentam uma estrutura produtiva muito diversificada, exibindo características muito distintas relativamente à competitividade e à coesão dos territórios, evidenciando diferenças notórias em termos do peso da atividade económica e da evolução do PIB (Produto Interno Bruto) per capita [CCDRC, 2016]. O Baixo Vouga é a sub-região que apresenta o maior número de áreas industriais, que no seu conjunto representam 20% do total da superfície industrial disponível na região Centro. Traduzindo-se assim na sub-região que mais

contribui para o PIB nacional e regional e uma das sub-regiões que apresenta maior PIB per capita e produtividade [URL5].

O sector primário representa, na região, 5,3% do VAB (Valor Acrescentado Bruto) e 23% do emprego, o sector secundário 33,8% e 30,4% respetivamente, e o sector terciário 60,9% e 46,6%. No contexto nacional, a Região regista, assim, em termos do VAB, um peso maior dos sectores primário e secundário e um menor peso relativo do sector terciário [CCDRC, 2010].

Sendo o PIB um indicador habitualmente utilizado para aferir e comparar o grau de desenvolvimento dos países ou regiões, é possível avaliar o nível de evolução relativamente a outras regiões, caso se relacione com o crescimento nacional. Na generalidade dos anos para o período em análise, a região Centro tem convergido positivamente para a média nacional [CCDRC, 2016]. Na região de Aveiro o peso das exportações de bens no PIB, em 2015, representa 52,4%, correspondendo a um valor muito acima do valor para a região Centro (32,3%) e de Portugal (27,6%), segundo os dados do INE. Relativamente ao peso das importações de bens no PIB, a região de Aveiro apresenta 37,8% enquanto a região Centro apresenta um peso de 21,3% e Portugal um peso de 33,2%. Relativamente à evolução a 20anos, entre 1993 e 2013, verificou-se um aumento no índice do poder de compra em todos os concelhos da região de Aveiro, exceto no concelho de Aveiro, o qual sofreu uma pequena redução.

A região tem sido dotada de infraestruturas, equipamentos de apoio à atividade económica, nomeadamente em áreas de acolhimento empresarial, centros tecnológicos, unidades de interface, de apoios diretos às empresas, ao nível da inovação empresarial, de qualificação e internacionalização. Houve assim alterações no perfil produtivo, reforço de fatores competitivos e ganhos em competitividade [CCDRC, 2016].

A região destaca-se por ser fortemente exportadora, no seu conjunto os municípios da CIRA apresentam uma taxa de cobertura das importações pelas exportações de 81,6%. Verifica-se que o saldo entre importações e exportações na CI da Região de Aveiro é bastante mais favorável nas relações comerciais extracomunitárias, ao invés do que acontece a nível nacional onde estes valores são praticamente equivalentes, mas com um saldo mais desfavorável para as extracomunitárias. Ao nível municipal, destaca-se a taxa de cobertura da Murtosa, ainda que o reduzido volume de comércio relativize bastante estes dados, principalmente Águeda (63,9%), Anadia (56,8%) e Sever do Vouga (66,3%). Em termos do volume das exportações destacam-se os municípios de Aveiro e de Ovar [CIRA, 2014].

Uma vez que a região se encontra localizada junto à ria, com uma vasta costa atlântica, torna-se assim uma região atrativa do ponto de vista turístico. Seguindo a tendência de todo o território nacional, a região de Aveiro tem demonstrado igualmente um crescimento a nível turístico. Uma das provas de adaptabilidade da região face ao aumento turístico exprime-se em existir um aumento anual do número de estabelecimentos turísticos.

3.4 Fontes e emissão de poluentes

Segundo a CCDRC (2010), a região Centro, na qual se enquadra a região de Aveiro, possui uma grande diversidade de fontes emissoras de poluentes para a atmosfera, nomeadamente:

- Agricultura
- Aterros (inertes, não perigosos e industriais)
- Fontes domésticas
- Indústria
- Instalações comerciais e institucionais
- Instalações portuárias e de reparação de embarcações
- Produção de eletricidade (centrais térmicas a biomassa e a gás natural)
- Uso de solventes
- Vias de circulação rodoviária e ferroviária

3.4.1 Indústria

O forte investimento em infraestruturas e a localização privilegiada da região promoveram o crescimento das zonas industriais em diversos municípios e freguesias, sendo que atualmente o setor da indústria é dos setores com maior importância para o desenvolvimento da região.

A região do Baixo Vouga, território em que se enquadram os municípios da CIRA, é uma região que apresenta elevada atividade industrial. Sendo que este setor tem um peso significativo na emissão de poluentes atmosféricos. Verifica-se assim, uma contribuição de 38% da matéria particulada (PM), de 12% no Monóxido de Carbono (CO) e de 14% nos óxidos de azoto (NOx). A atividade industrial com maior peso nos valores de emissões da matéria particulada corresponde à indústria da cerâmica (26%) e à indústria de pasta/papel/cartão (22%). Para as emissões de CO a indústria de cimento/cal/gesso tem maior peso (34%), seguido da indústria de pasta/papel/cartão (30%) e para as emissões de NOx a indústria com maior carga é a de vidro (24%), seguida da indústria de pasta/papel/cartão (20%). [CCDRC, 2015]

Com isto, como já foi referido, a região Centro é um grande foco comercial e industrial sendo que de uma maneira geral os distritos de Coimbra, Aveiro e Leiria são os que apresentam maior quantidade de emissões de poluentes, estando assim relacionados com o número, atividade e dimensão dos estabelecimentos existentes nesses distritos [CCDRC, 2015]. Segundo o inventário regional criado pela Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro (CCDRC), com base nos estabelecimentos abrangidos, o Baixo Vouga tem uma contribuição de 17% das emissões totais na região Centro para o CO₂, de 38% para as partículas, de 12% para CO, de 14% para NOx, de 17% para o SO₂, de 33% para H₂S, de 26% para ClCl (Compostos Inorgânicos Clorados), de 53% para ClF (Compostos Inorgânicos Fluorados) e de 49% para MPT (Metais Pesados Totais). Estima-se que, em 2015, o Baixo Vouga emitiu 1541470 ton/ano de CO₂, 857 ton/ano de partículas, 1918 ton/ano de CO, 1293 ton/ano de NOx e 673 ton/ano de SO₂.

3.4.2 Agricultura

O setor da agricultura surge como uma fonte de emissão com grande impacto na qualidade do ar e bem-estar da população, uma vez que das atividades agrícolas podem resultar poeiras, fumo, gases e odores. Contudo, a principal fonte de partículas, monóxido de carbono e hidrocarbonetos é a queima aberta de resíduos agrícolas [Vallero, 2008].

Na UE-28, em 2015, 94% das emissões de NH_3 foram provenientes da agricultura. Sendo que este setor também contribui para as emissões de matéria particulada, de compostos orgânicos voláteis não metano (COVNM) e de BaP (Benzo(a)pireno). A agricultura surge como a terceira fonte mais importante de emissões de PM_{10} na UE (em 2015, correspondia a 15% das emissões totais na UE) e como a segunda maior fonte de BaP (em 2015, 12% das emissões totais na UE) [EEA, 2017].

A região da CIRA em 2009, segundo o INE, possuía uma Superfície Agrícola Utilizada (SAU) de 23 627ha, sendo que o valor de SAU entre 1999 e 2009 diminuiu em 23%. No entanto, na região de Aveiro existem diversas freguesias com características fortemente rurais sendo que continuam a possuir vastas áreas destinadas à agricultura e pecuária tornando-se assim um setor com um impacto na qualidade do ar da região.

3.5 Caracterização Climatológica

A dispersão da poluição no ar é afetada por diversos fatores, tais como, as condições meteorológicas (em particular, a velocidade e direção do vento e a estabilidade atmosférica), as características geográficas locais e regionais, e as características da fonte de emissão, isto é, varia caso a emissão seja de uma fonte pontual ou um número difuso de fontes, e ainda, caso a emissão seja feita à altura do solo (tráfego rodoviário) ou a um nível mais elevado (emissões provenientes de chaminés). Frequentemente, por falta de dados de um local, é necessário determinar se o registo feito noutro local pode ser usado para inferir valores de um determinado parâmetro. Existe uma variedade de fatores que ajudam a determinar se as medidas de um parâmetro num local são semelhantes às medições efetuadas noutro local, tal como por exemplo, as características climatológicas dos locais, a topografia, cobertura vegetal presente e a altura acima do solo a que foi efetuada a medição. Assim, estudar as características do local caso de estudo torna-se um ponto fulcral para entender a dispersão de poluentes e a qualidade do ar na região [Vallero, 2008; EEA, 2008].

As características topográficas e orográficas de Portugal continental, assim como uma concentração intensa de população, de indústrias e de vias de comunicação junto à costa, levam a que as circulações atmosféricas de mesoescala, nomeadamente as brisas costeiras, adquiram um papel predominante no transporte e na dispersão dos poluentes atmosféricos [Valério, 2010].

Segundo o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), no distrito de Aveiro existem estações climatológicas em Anadia, Arouca e Aveiro (localizada na Universidade de Aveiro), encontrando-se a uma altitude de respetivamente 45m, 270m e 5m. Assim, com base nas características da região de Estarreja e na proximidade das regiões, serão utilizados os dados referentes à estação de Aveiro.

O clima é considerado um fator fundamental para entender a formação, constituição e funcionamento de qualquer território, e é o responsável pelo tipo geral de atividade biológica constituindo um dos parâmetros importantes na definição de unidades territoriais com vista ao ordenamento [PDM Ovar, 2013]. O clima sobre Portugal Continental classifica-se em duas categorias distintas Csa e Csb, segundo a classificação de Köppen-Geiger, sendo que a região de Aveiro se enquadra na categoria Csb, correspondendo assim a uma região que apresenta um verão seco (Cs) e temperado - temperatura média do mês mais quente é menor ou igual a 22°C e durante quatro ou mais meses com temperatura média superior a 10°C (Csb) [Chazarra et al., 2011].

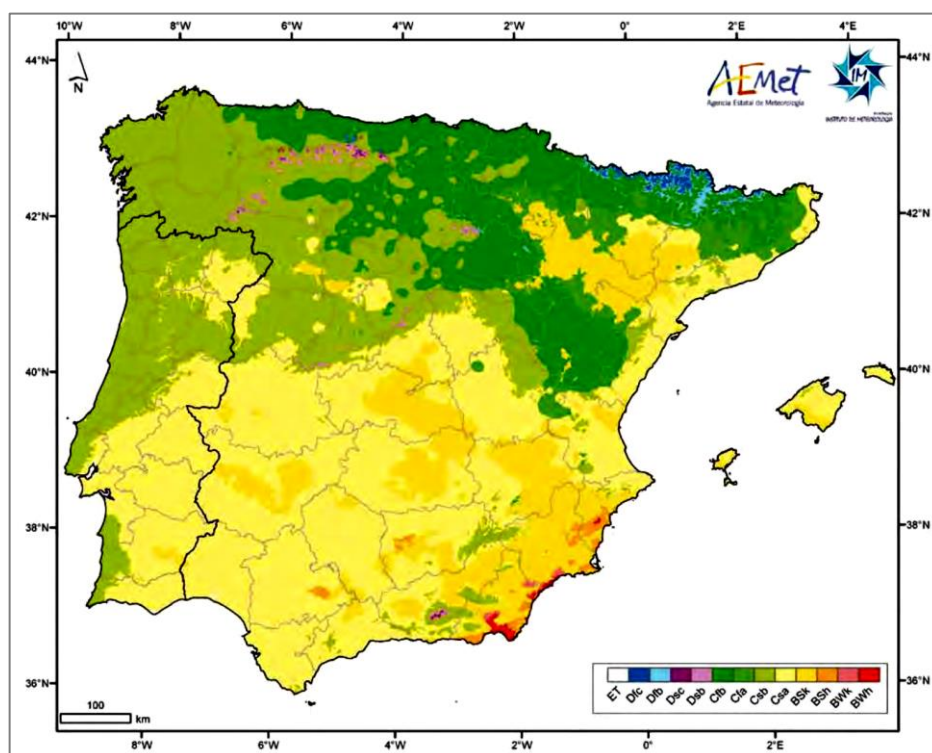


Figura 6- Classificação climática de Köppen-Geiger na Península Ibérica [Chazarra et al., 2011].

3.5.1 Temperatura

A temperatura desempenha um papel importante na química dos poluentes e na sua dispersão vertical na atmosfera. Sendo que as temperaturas elevadas registadas, por exemplo no verão, favorecem a formação de Ozono, e no inverno, as diferenças de temperatura entre a noite e o dia podem provocar inversões térmicas que conduzem a eventos de poluição. A temperatura do ar tende a diminuir em altitude, no entanto, em determinadas condições pode ocorrer uma inversão térmica, ou seja, pode verificar-se um aumento de temperatura, criando uma camada de ar quente que impede o ar poluído junto ao solo de subir e se dispersar [URL6].

Na região, a nível térmico, tanto os verões como os invernos são moderados por influência do oceano. A Figura 7 mostra uma temperatura média anual na ordem dos 15°C, sendo que no mês mais quente ronda os 20°C e no mais frio cerca de 9°C [URL7]. Com as temperaturas mais baixas a observarem-se nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro e as mais elevadas centradas nos meses de julho, agosto e setembro. A região do Baixo Vouga é caracterizada pela forte influência do fator amenizador exercido pelo oceano, funcionando assim como eficaz regulador térmico levando a que as amplitudes térmicas sejam pouco significativas [CCDRC, 2010].

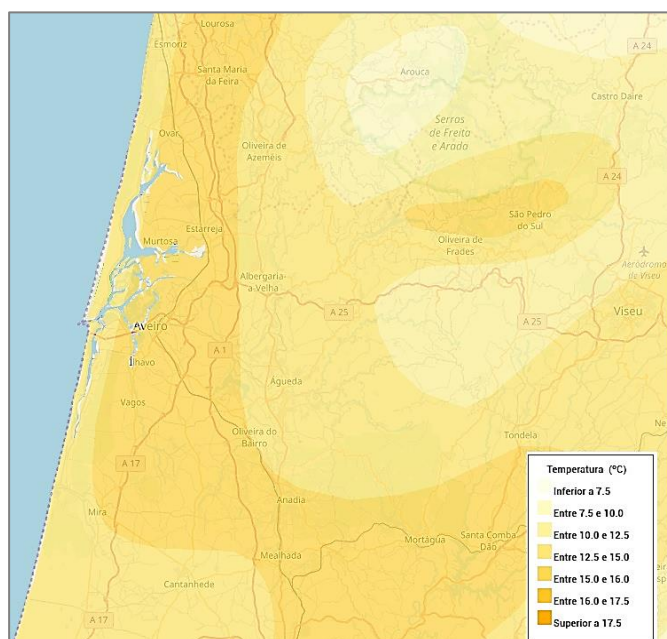


Figura 7- Temperatura média anual [Fonte: SNIAMB].

3.5.2 Precipitação e Humidade

A precipitação está geralmente associada a uma atmosfera instável, favorecendo uma boa dispersão dos poluentes atmosféricos. As gotas de chuva solubilizam os poluentes gasosos e as partículas, provocando a sua deposição sobre o solo e outras superfícies, diminuindo assim as concentrações no ar ambiente [URL6].

Com base na normal climatológica de 1971-2000 da estação meteorológica da Universidade de Aveiro verifica-se que o ritmo pluviométrico não se apresenta contínuo, demonstrando uma clara variabilidade das estações do ano. Em que os períodos de maior precipitação ocorrem entre outubro e abril, com a existência de uma maior ou menor estação seca, características estas que denunciam claramente a sua influência mediterrânea.

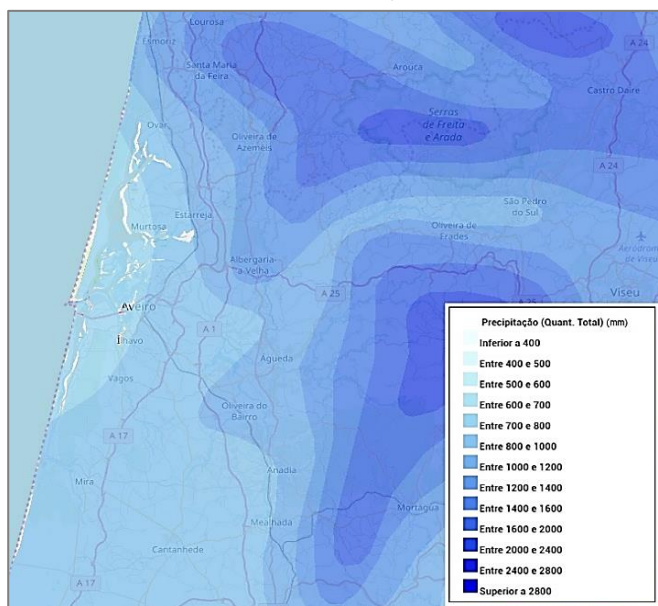


Figura 8- Precipitação média anual [Fonte: SNIAMB].

A região sofre grande influência do mar devido à sua proximidade, sendo que a humidade relativa média apresenta valores na ordem dos 78%, atingindo valores mínimos de 69% em agosto e valores máximos na ordem dos 83% nos meses de dezembro e janeiro [URL7].

3.5.3 Vento

O processo de dispersão dos poluentes atmosféricos pode ser dividido em duas componentes principais: a componente da mistura vertical influenciada pela turbulência gerada pelo gradiente vertical da temperatura entre as camadas da baixa atmosfera; e pela componente horizontal associada ao vento médio, sendo este um dos principais agentes tanto no transporte como na difusão de efluentes gasosos [URL8]. A ausência de vento irá provocar a manutenção da poluição nos lugares de emissão, apresentando-se a velocidade como fator decisivo na diminuição das taxas de poluição [Valério, 2010].

Os dados medidos na torre meteorológica localizada na Universidade de Aveiro permitem concluir que os ventos mais frequentes sopram essencialmente de quarto quadrante, em particular de norte (N) e de noroeste (NW), sendo as direções correspondentes aos ventos de maior intensidade. Os ventos que sopram de segundo quadrante, entre sul (S) e sudeste (SE), têm também uma elevada frequência, no entanto, com menores intensidades [Borrego et al., 2011; Sorte et al., 2018].

Em termos médios, a velocidade média do vento é mínima nos meses de verão e máxima na primavera. Os valores médios oscilam aproximadamente entre os 2 e 4 m.s⁻¹ (às 9 horas) aumentando de 4 a 6 m.s⁻¹ (à tarde). Os ventos predominantes durante o ano provêm de SE ou NW (às 9 horas) e de NW (às 15 horas) [Valério, 2010].

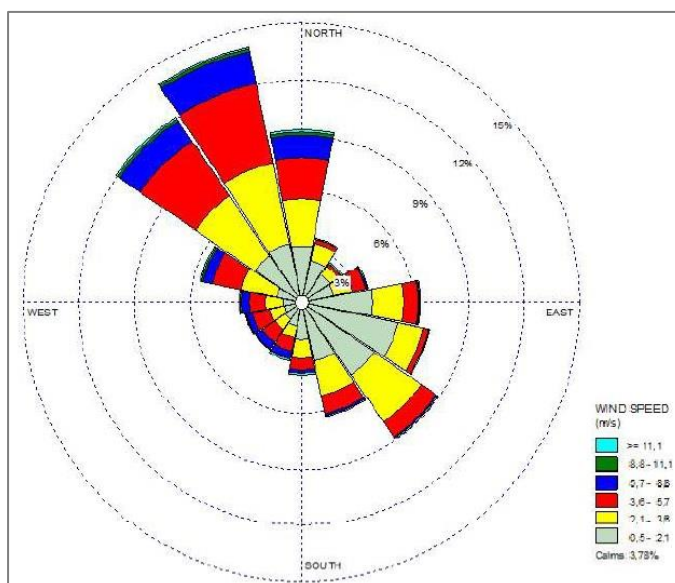


Figura 9 - Velocidade e direção média anual do vento no período 2006-2013, em Aveiro [Sorte et al., 2018].

3.5.4 Radiação Global

A radiação solar pode contribuir para a formação de poluentes fotoquímicos, como por exemplo, o Ozono. Para a região de Aveiro, a radiação global apresenta uma média anual próxima de 150 W/m^2 , atingindo o seu máximo no mês de junho com 243 e o seu mínimo em dezembro, com 51 W/m^2 [URL7].

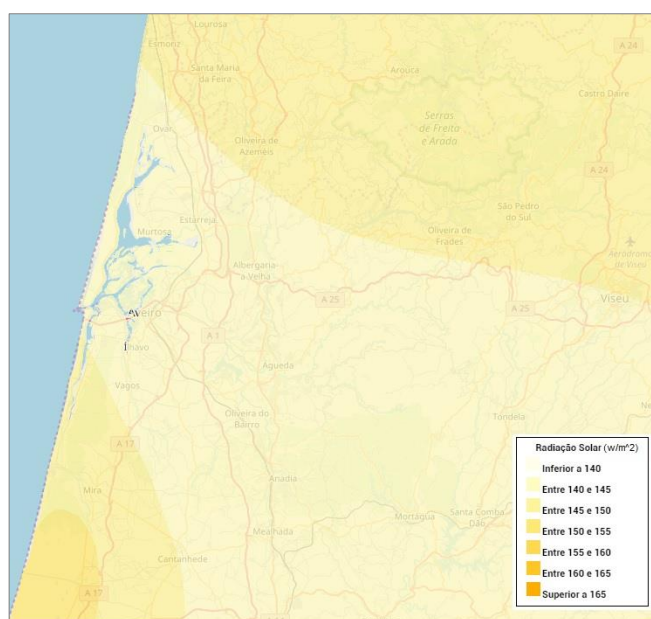


Figura 10- Radiação solar média anual [Fonte: SNIAmb].

4. Metodologia de Avaliação da Qualidade do Ar na Região de Aveiro

Segundo o decreto-lei relativo à qualidade do ar atualmente em vigor, a avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente no território nacional deve ser usada uma ou mais das seguintes técnicas de avaliação:

- Medições fixas, usando métodos de referência ou equivalentes
- Medições indicativas
- Modelação
- Estimativas objetivas

A amostragem e a monitorização são necessárias para avaliação e controlo da poluição do ar, sendo que em qualquer situação são necessárias para obter dados precisos ou efetuar aproximações mais adjacentes da realidade possível [Vallero, 2008]. Contudo, os modelos numéricos vocacionados para a simulação do escoamento e dispersão de espécies químicas na atmosfera constituem uma componente cada vez mais essencial na elaboração e execução de planos estratégicos de gestão integrada da qualidade do ar e na adoção de medidas eficazes de controlo da poluição atmosférica particularmente em zonas urbanas [Amorim, 2003].

4.1 Rede de Monitorização da Qualidade do Ar na Região de Aveiro

A monitorização de poluentes surge face à necessidade de proceder à avaliação da qualidade do ar em todo o território, de modo avaliar o cumprimento dos limites legais estabelecidos pelo Decreto-Lei nº 43/2015, de 27 de março, o qual estabelece o regime da avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente.

Para a avaliação e gestão da qualidade do ar foram definidas unidades funcionais baseadas nos conceitos de zona e aglomeração. Uma zona corresponde a uma área geográfica com características homogéneas, em termos de qualidade do ar, ocupação do solo e densidade populacional. Uma aglomeração é uma área constituída por um número de habitantes superior a 250 000 ou em que o número de habitantes se situe entre os 250 000 e 50 000 e tenha uma densidade populacional superior a 500 habitantes/km². Uma aglomeração é de facto uma zona, no entanto os critérios que a definem são mais objetivos, estando apenas relacionados com parâmetros estatísticos da população residente nessa área [APA, 2015].

As estações de monitorização da qualidade do ar são classificadas tendo em consideração o ambiente envolvente, a área onde estão localizadas e o tipo de fonte de emissão que influencia os níveis de qualidade do ar medidos.

De acordo com a legislação e tendo em conta as características da região considera-se suficientemente representativo da qualidade do ar da região as estações de monitorização atualmente ativas. Na rede nacional de monitorização da qualidade do ar a região Centro encontra-se delimitada em três zonas (Zona Centro Interior, Zona Centro Litoral e Zona Litoral Noroeste do Baixo Vouga) e duas aglomerações (Aglomeração de Coimbra e Aglomeração de Aveiro/ Ílhavo). Os municípios da CIRA enquadram-se na zona Litoral Noroeste do Baixo Vouga e na Aglomeração de Aveiro/ Ílhavo [URL9].

A Agência Portuguesa do Ambiente (APA) juntamente com as CCDRCs e de acordo com o exigido pela União Europeia, face à necessidade de avaliar a qualidade do ar em todo o território da região com vista a implementar o Decreto-Lei n.º 276/99, de 23 de julho, definiram que cada aglomeração deveria possuir uma estação para acompanhamento da poluição originada pelo tráfego rodoviário (equipada com analisadores de NO_x, CO, PM₁₀), e uma estação, que não sofra influência direta de qualquer fonte emissora, do tipo de influência de fundo (equipada com analisadores de SO₂, NO_x, O₃ e PM₁₀), com o

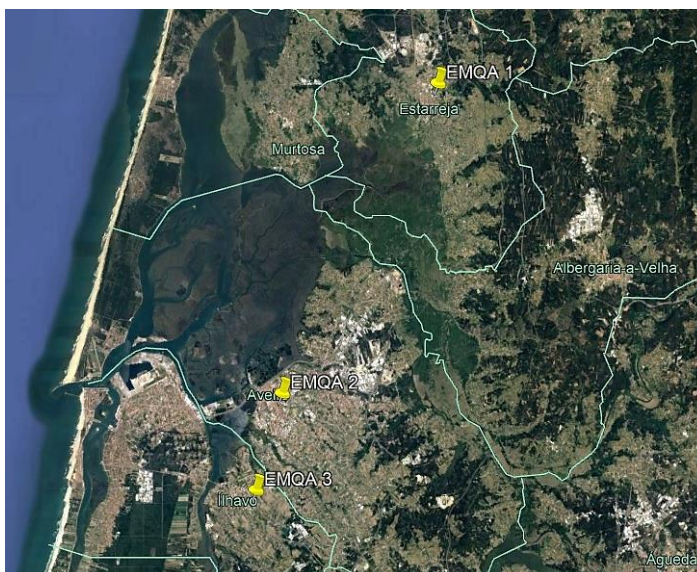


Figura 11- Localização das Estações de Monitorização da Qualidade do Ar na Região de Aveiro, em que a EMQA 1 é a estação de fundo de Estarreja, a EMQA 2 é a estação de tráfego de Aveiro e a EMQA 3 é a estação de fundo de Ílhavo.

objetivo de determinar a qualidade do ar “média” nas referidas áreas [Monteiro, 2007]. Deste modo, para a aglomeração Aveiro/ Ílhavo surge uma estação de monitorização de qualidade do ar na Escola Secundária José Estevão, em Aveiro, do tipo de influência de tráfego e uma segunda estação de monitorização em Ílhavo, em zona urbana, do tipo de influência de fundo. Na região de Aveiro existe ainda uma terceira EMQA localizada na Escola Secundária de Estarreja.

A monitorização é efetuada em modo contínuo por analisadores instalados em pontos estratégicos (ver Figura 11), sendo os dados armazenados remotamente para uma unidade de gestão regional, permitindo assim através de um software próprio o tratamento e armazenamento dos dados obtidos. Pontualmente, são efetuadas ainda amostragens com tubos de difusão sendo posteriormente submetidos a uma análise química de modo a aferir determinados poluentes.

Na Tabela 4 é possível verificar as estações existentes na região de Aveiro por tipo de ambiente, tipo de influência e zona.

Tabela 4- Estações de monitorização da qualidade do ar na região de Aveiro em 2018 [Fonte: QualAr]

Estação	Estarreja (EMQA 1)	Aveiro (EMQA 2)	Ílhavo (EMQA 3)
Tipo de Ambiente	Suburbana	Urbana	Suburbana
Tipo de Influência	Fundo	Tráfego	Fundo
Zona / Aglomeração	Litoral Noroeste do Baixo Vouga	Aveiro/Ílhavo	Aveiro/Ílhavo

Em particular, no ano civil de 2017, a APA procedeu a alteração da localização da estação de monitorização da qualidade do ar de Estarreja-Teixugueira para a Escola Secundária de Estarreja, tendo a estação iniciado medições na nova localização no início de 2018. Aquando da mudança de

localização da estação suburbana ocorreu igualmente a alteração do tipo de influência da estação de Industrial para o tipo de influência de Fundo.

Na Tabela 5 encontra-se as classificações das estações de acordo com o ambiente em que se insere e por tipo de fonte de emissão.

Tabela 5- Classificação das estações de acordo com o ambiente envolvente e por fonte de emissão predominante [APA, 2015]

Classificação da estação de acordo com o ambiente envolvente	Urbana	Corresponde a uma área caracterizada por uma contínua edificação.
	Suburbana	Zona em parte construída: implantação contínua de construções isoladas combinadas com zonas não urbanizadas (pequenos lagos, bosques, terrenos agrícolas).
	Rural	Todas as zonas que não preenchem os critérios definidos para as zonas urbanas/suburbanas. As estações rurais podem ainda ser classificadas em rurais perto de cidade, rurais regionais e rurais remotas.
Classificação da estação por fonte de emissão dominante	Tráfego	A sua localização leva a que o seu nível de poluição seja influenciado principalmente pelas emissões do tráfego rodoviário resultante da proximidade com estradas.
	Industrial	A sua localização leva a que o seu nível de poluição seja influenciado principalmente por fontes industriais isoladas ou áreas industriais situadas na proximidade.
	Fundo	Corresponde a uma estação cujo nível de poluição não é influenciado diretamente por uma determinada fonte de emissão (tráfego rodoviário ou indústria), sendo assim o resultado de emissões de diversas fontes de emissão.

Na Tabela 6, é possível observar os poluentes ainda monitorizados em 2018 por estação de monitorização. As estações encontram-se localizadas estrategicamente, sendo que a estação de Estarreja se encontra localizada a sul do Complexo Químico de Estarreja.

Tabela 6- Poluentes monitorizados em 2018 na Aglomeração de Aveiro/Ílhavo e em Estarreja [Fonte: QualAr]

Zona/ Aglomeração	Estação	Coordenadas geográficas (WGS84)		Poluentes monitorizados (em 2018)							
		Longitude	Latitude	NO	NO ₂	NO _x	PM _{2,5}	PM ₁₀	SO ₂	CO	O ₃
Litoral Noroeste do Baixo Vouga	Estarreja	-8°34'2"	40°45'31"	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓
Aglomeração de Aveiro/Ílhavo	Escola Secundária José Estêvão (Aveiro)	-8°38'48"	40°38'08"	✓	✓	✓	-	✓	-	✓	-
	EB 2,3 Gabriel de Ançã (Ílhavo)	-8°40'14"	40°35'23"	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	✓

4.2 Modelação da Qualidade do Ar

O termo modelação é uma técnica de simulação dos fenómenos que ocorrem na natureza, que permite estimar, com maior exatidão possível, a concentração dos poluentes num conjunto de pontos com base num conjunto de variáveis que a influenciam [Decreto-Lei n.º 102/2010, de 23 de setembro].

A modelação da qualidade do ar é então uma ferramenta essencial que permite conhecer e estudar a atmosfera, os seus constituintes e os fenómenos que nela ocorrem, com o objetivo de uma melhor gestão da qualidade do ar. Assim, recorre-se a modelos quando a complexidade de uma realidade inviabiliza a sua análise e o seu estudo direto. Auferindo de particular interesse no apoio à decisão política, uma vez que permite estabelecer relações entre as emissões e concentrações resultantes com a exposição humana [Ferreira, 2007].

Os danos causados pela poluição atmosférica resultam das elevadas concentrações e deposição de componentes químicos, sendo que estes dependem da massa total emitida para a atmosfera e a distribuição temporal/espacial, dos processos de transporte, deposição e transformação na atmosfera. Para descrever a dispersão e o transporte de poluentes na atmosfera, os modelos podem ser classificados quanto à [Nixon et al., 1999; Mesquita, 2005]:

- Escala espacial (microescala/local, urbana, regional e global)
- Escala temporal (modelos episódicos, modelos de longo prazo)
- Tratamento das equações de transporte (euleriano e lagrangeano)
- Tratamento de vários processos (químicos, deposição seca e húmida)
- Complexidade da aproximação

A modelação numérica da qualidade do ar recorre a dois tipos de modelos de aproximação matemática para descrever a dispersão dos poluentes atmosféricos: modelos lagrangeanos e modelos eulerianos. O modelo de trajetória lagrangeano que emprega uma estrutura de referência móvel e o modelo de malha euleriana que utiliza um sistema de coordenadas fixo em relação ao

solo. Os modelos lagrangeanos apesar de requererem um menor esforço computacional contém uma grande desvantagem, uma vez que descrevem os processos físicos de forma muito incompleta. A maioria dos modelos fotoquímicos de qualidade do ar atualmente utilizados recorrem à resolução matemática tridimensional da malha Euleriana, que permite uma melhor e mais completa caracterização dos processos físicos na atmosfera, permitindo assim que as concentrações de espécies químicas sejam previstas em todo o domínio do modelo [Vallero, 2008].

Com o intuito de determinar a precisão dos resultados, os modelos matemáticos requerem uma avaliação e validação. A avaliação científica de um modelo tem como principais objetivos assegurar que [Britter e Schatzmann, 2007]:

- Todos os fenómenos importantes entre a gama do modelo sejam incluídos
- A modelação matemática destes fenómenos e as simplificações e parametrizações associadas são bem justificadas em termos da ciência e da funcionalidade do modelo
- Os limites de aplicabilidade do modelo são claros e explícitos
- O utilizador é capaz de avaliar se o modelo aplicado é, ou não, adequado para o seu propósito específico

A precisão dos resultados está ainda relacionada com a qualidade dos dados de entrada (meteorologia, emissões, condições iniciais e de fronteira), as incertezas nas suposições/aproximações, as parametrizações do modelo, o tipo de aplicação e as características específicas do local [Nixon et al., 1999; Mesquita, 2005]. Os modelos atmosféricos são indispensáveis nos estudos da qualidade do ar, contudo é necessário ter em consideração as suas limitações [Mesquita, 2005].

4.2.1 Modelo CFD VADIS

O modelo VADIS, do tipo de computação da dinâmica dos fluidos (CFD - Computational Fluid Dynamics, em inglês), tem desde a sua primeira versão estado em contínuo desenvolvimento. O modelo foi validado com base nos resultados da simulação em túnel de vento realizadas no Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, tendo sido também comparado com resultados do modelo comercial FLUENT, demonstrando em ambos os casos bom desempenho no cálculo dos campos de vento e dispersão de poluentes [Costa, 2003].

O modelo permite a definição de vários obstáculos (tais como edifícios e árvores), fontes em linha, e a simulação de campos de vento e de concentração variáveis, conseguindo, deste modo, calcular os campos de concentração sobre geometria complexas, tornando possível a aplicação num maior número de situações de poluição atmosférica [Costa, 2003].

O VADIS é um modelo composto por dois módulos: o FLOW, módulo de camada limite do tipo euleriano e o DISPER, módulo de dispersão lagrangeana. A utilização do módulo FLOW e DISPER fornecem dados de saída, que se encontram representados numa malha cartográfica, constituídos respetivamente, pelas três componentes da velocidade do vento e pela concentração de poluentes em cada célula da malha respetivamente.

Uma vez que todos os modelos possuem maiores ou menores limitações: o modelo VADIS tem como principais limitações a não inclusão das características topográficas (tais como a elevação do terreno), de radiação e de humidade, e ainda o modelo não engloba as reações químicas que ocorrem na atmosfera assim como a deposição dos poluentes [URL10].

A Figura 12 apresenta o esquema de funcionamento dos dois módulos que integram o modelo VADIS.

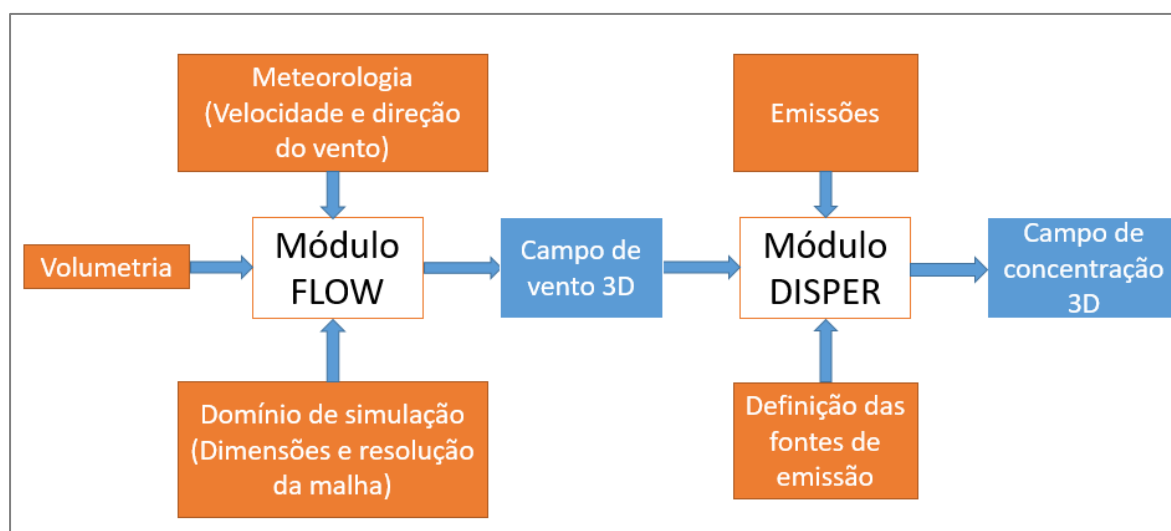


Figura 12- Representação esquemática dos dados de entrada e saída para os módulos FLOW e DISPER [Borrego et al., 2003].

4.2.1.1 Módulo FLOW

O módulo FLOW calcula o campo de ventos com base nas leis fundamentais da mecânica de fluidos, simplificadas a partir de determinados pressupostos e complementadas com formulações de fecho, nomeadamente para a modelação da turbulência. O cálculo é feito a partir das equações de Navier-Stokes com média de Reynolds para o escoamento estacionário em camada limite atmosférica em regime turbulento [Costa, 2003].

Este módulo, utiliza duas malhas diferentes, uma para o vento (malha meteorológica) e outra para as redes cartográficas (malha cartográfica). A malha cartográfica encontra-se sempre orientada segundo os eixos cartesianos e suporta a localização e a definição dos edifícios, árvores e ruas no domínio de estudo selecionado. O campo de ventos é calculado sobre uma malha euleriana cartesiana tridimensional. O campo de velocidades calculado sobre a malha de campo de ventos é posteriormente convertido para a malha cartográfica. A dimensão da malha e o número de células em cada eixo deve estar dependente da precisão requerida e da capacidade computacional [Borrego et al., 2003; Costa, 2003].

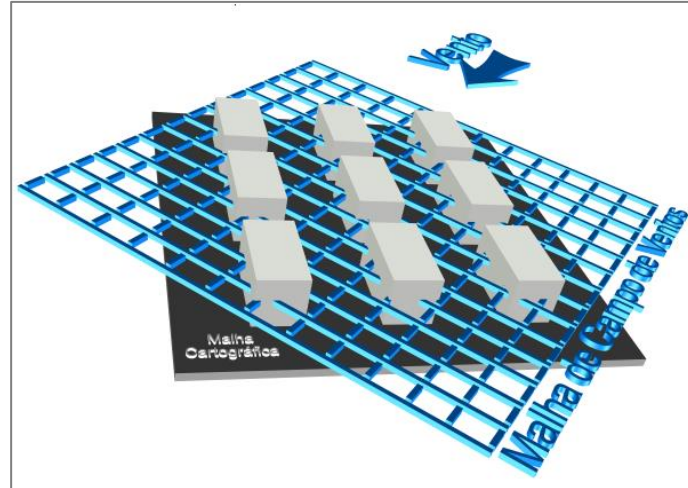


Figura 13- Esquema das malhas de campo de vento e cartográfica [Costa, 2003].

Assim, o módulo FLOW utiliza a solução numérica tridimensional das equações de Navier-Stokes recorrendo a médias de Reynolds e aplicando um fecho de turbulência k-ε de primeira ordem, para calcular os campos 3D para o vento, viscosidade turbulenta, pressão, turbulência e a temperatura [Borrego et al.,2003].

A equação 1 corresponde à equação de conservação da massa e a equação 2 corresponde às equações de Navier-Stokes da conservação de quantidade de movimento linear [Rodrigues et al., 2018].

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{[Equação 1]}$$

$$u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu_e \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) + S_u \quad \text{[Equação 2]}$$

Em que, u_i representa as componentes da velocidade (u , v e w), x_i as coordenadas espaciais (x , y e z), P a pressão, ρ a densidade do ar, ν_e a viscosidade efetiva e S_u representa o termo fonte.

Sendo que o sistema final de equações para k e ϵ , é:

$$u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + \left(\beta g_i \cdot \frac{\nu_t}{\sigma_t} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \epsilon \quad \text{[Equação 3]}$$

$$u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \cdot \frac{\epsilon}{k} \cdot \left(G_k + \beta g \cdot \frac{\nu_t}{\sigma_t} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) (1 + C_3 Ri) - C_3 \frac{\epsilon^2}{k} \quad \text{[Equação 4]}$$

Onde,

$$\nu_t = C_u \frac{k^2}{\epsilon} \quad \text{[Equação 5]}$$

No sistema de equações, k e ϵ representam, respetivamente, a energia cinética turbulenta e a dissipação viscosa, u_i as componentes horizontais e vertical da velocidade, ν_t a difusividade turbulenta, G_k a produção de energia cinética turbulenta, C_1 , C_2 , C_3 , C_μ , σ_t , σ_k , σ_ϵ são constantes do modelo k-ε (sendo definidas, respetivamente, por 1.44, 1.92, 1.44, 0.09, 0.9, 1 e 1.22) e, finalmente, Ri o número de Richardson [Borrego et al.,2003; Costa, 2003].

4.2.1.2 Módulo DISPER

O módulo DISPER aplica a aproximação lagrangeana na computação do campo tridimensional da concentração de poluente usando o campo de ventos estimados pelo módulo FLOW. Esta metodologia assume que a dispersão espacial e temporal da massa de poluente emitida é convenientemente representada por um grande número de partículas libertadas aleatoriamente no escoamento [Borrego et al.,2003].

A cada espaço de tempo, o deslocamento de uma partícula é calculado pela soma de uma componente determinística, obtida a partir do campo de velocidade, da componente aleatória relacionada com a turbulência local e pela flutuação [Costa, 2003]. A seguinte equação traduz a teoria estocástica de Langevin:

$$du = -\left(\frac{u}{T_L}\right)dt + du' \quad \text{[Equação 6]}$$

Onde u é uma das três componentes espaciais da velocidade, T_L é a escala temporal Lagrangeana e u' uma componente aleatória da velocidade.

Inicialmente, o campo de ventos é calculado em condições estacionárias, depois o DISPER calcula o deslocamento das partículas numéricas aleatoriamente distribuídas no escoamento através da malha cartográfica. O processo de cálculo do campo de velocidade e da dispersão Lagrangeana é repetido ciclicamente para cada período de tempo considerado, atualizando os dados relacionados com a velocidade do vento, direção e da taxa de emissão. O resultado final que contém os campos de velocidade média e de concentração é representado na malha cartográfica [Borrego et al.,2003].

4.2.1.3 Dados de Entrada

Tal como foi referido previamente na Figura 12, o cálculo do campo de ventos requer informações de entrada acerca das condições meteorológicas, tal como, a velocidade e direção do vento à entrada do domínio para uma determinada altitude e temperatura do ar; depende igualmente da definição dos obstáculos presentes na área do domínio, sendo necessário localizar os edifícios e árvores através das suas coordenadas, e por fim, é necessário localizar na malha cartográfica as fontes emissoras [Borrego et al.,2003; Costa, 2003].

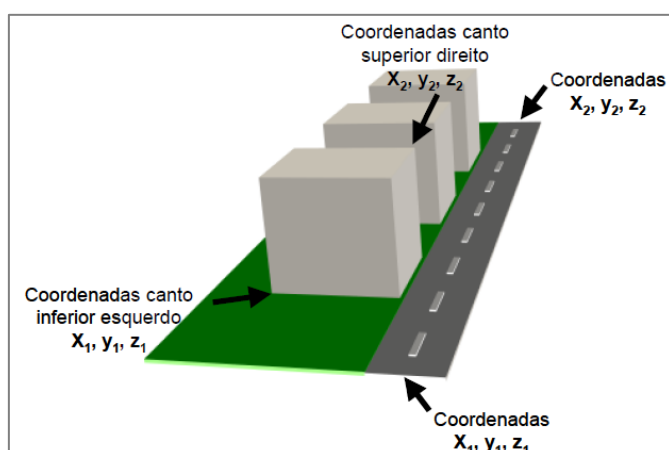


Figura 14- Localização dos obstáculos e fontes emissoras na malha cartográfica [Costa, 2003].

O método de representação dos obstáculos e das fontes emissoras é exemplificado na Figura 14. Uma vez que o VADIS utiliza uma malha estruturada regular, na qual as células são do tipo cubo ou paralelepípedo, para representar os obstáculos mais complexos é necessário dividi-los em secções geometricamente regulares. Os edifícios podem estar alinhados ou em ângulo com a malha cartográfica. Cada obstáculo é representado usando as coordenadas do canto inferior esquerdo e as coordenadas do canto superior

direito bem como os respetivos ângulos entre 0° e 90° . A representação com maior ou menor exatidão da estrutura real está diretamente relacionada com a resolução da malha utilizada e o tempo de simulação disponível [Borrego et al., 2003; Costa, 2003].

As fontes de emissão a representar podem ser do tipo: pontual, em linha ou em volume. Estas são definidas na malha pelas coordenadas das extremidades do seu eixo axial, e as suas respetivas taxas de emissão [Borrego et al., 2003].

Na Figura 15, encontra-se representada a esquematização dos dados de entrada considerados necessários para o modelo CFD VADIS neste caso de estudo, de modo a caracterizar a área de estudo e avaliar a qualidade do ar da região.

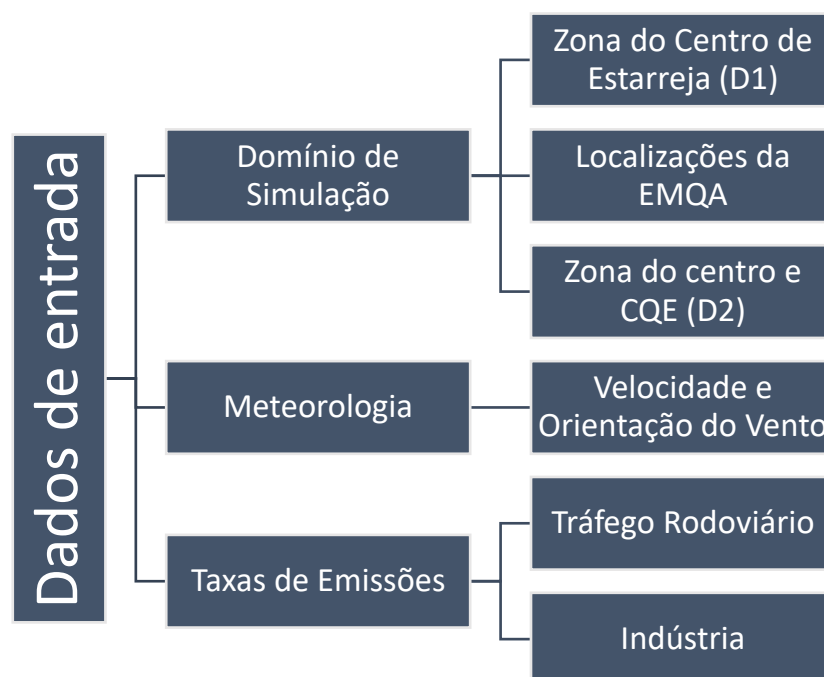


Figura 15- Esquema dos dados de entrada para as simulações com o modelo VADIS.

4.2.2 Domínio de Simulação

O concelho de Estarreja possui uma área total de 108 km², com 26 997 habitantes e encontra-se localizado em contacto com a Ria de Aveiro, na região de Aveiro. Atualmente a atividade económica predominante é a indústria transformadora, que representa quase 60% do volume de negócios do concelho [URL5]. No concelho existe uma grande quantidade de acessos por estrada sendo as mais importantes a EN1-12, a estrada nacional N109, a autoestrada A1, a autoestrada A29 e caminhos de ferro (linha ferroviária do Norte). O município tem 2659 empresas correspondendo a uma densidade de 24,6 N.º/km², segundo os dados do INE para 2016 (sendo de 24,5 N.º/km² para a região de Aveiro). Das 5 freguesias (Avanca, Beduído e Veiros, Canelas e Fermelã, Pardilhó e Salreu) que constituem o concelho de Estarreja: 2 são áreas predominantemente urbanas (Avanca; Beduído e Veiros), 2 são áreas mediantemente urbanas (Pardilhó; Salreu) e a freguesia de Canelas e Fermelã é especialmente rural.

Com o intuito de atingir os objetivos propostos definiram-se diferentes áreas de estudo: uma área que corresponde aproximadamente ao centro urbano do município de Estarreja, com uma área de 1,1 km x 1,2 km, a região D2 com dimensões aproximadamente de 2 km x 3,6 km, que inclui o centro do município de Estarreja e as grandes fontes pontuais existentes no Complexo Químico, e domínios da localização antiga da EMQA em Estarreja-Teixugueira e a localização atual na Escola Secundária de Estarreja.

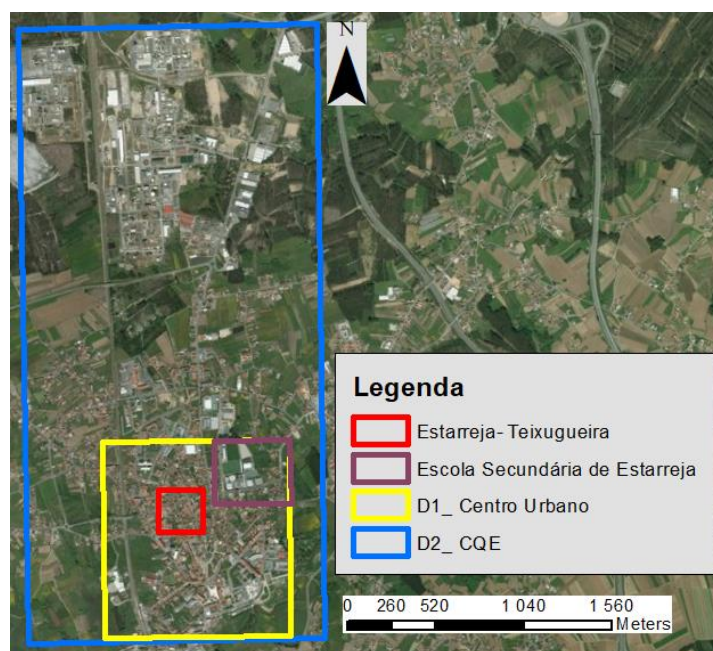


Figura 16- Domínios de simulações

Na Figura 17, encontra-se representado o domínio de simulação D1 criado em ArcGIS incluindo a representação dos edifícios, das estradas e das árvores. Os edifícios e árvores possuem como atributos a altura, sendo que as árvores têm uma altura para o tronco (z1) e altura total (tronco e copa) (z2).

O domínio de simulação D1 possui 1395 polígonos referentes a edifícios, 325 árvores (com tamanho total superior a 2m) e 160 segmentos de estradas, possuindo uma altura do domínio de simulação de 105 m. Sendo a altura do domínio igual a 5 vezes a altura do edifício mais alto (igual a 21 m), de acordo com as normas da COST732 [Franke et al., 2007].



Figura 17- Domínio de simulação D1 processado em ArcGIS.

O domínio de estudo D2 mantém o mesmo rigor no domínio D1 no entanto engloba ainda 5 fontes pontuais, correspondendo estas ao CQE. Devido à sua localização, a influência do CQE na qualidade do ar da área urbana de Estarreja é altamente dependente da direção do vento. O CQE apresenta potencial impacto na qualidade do ar da área urbana para ventos provenientes do quarto quadrante. O domínio D2 encontra-se representado na Figura 18.

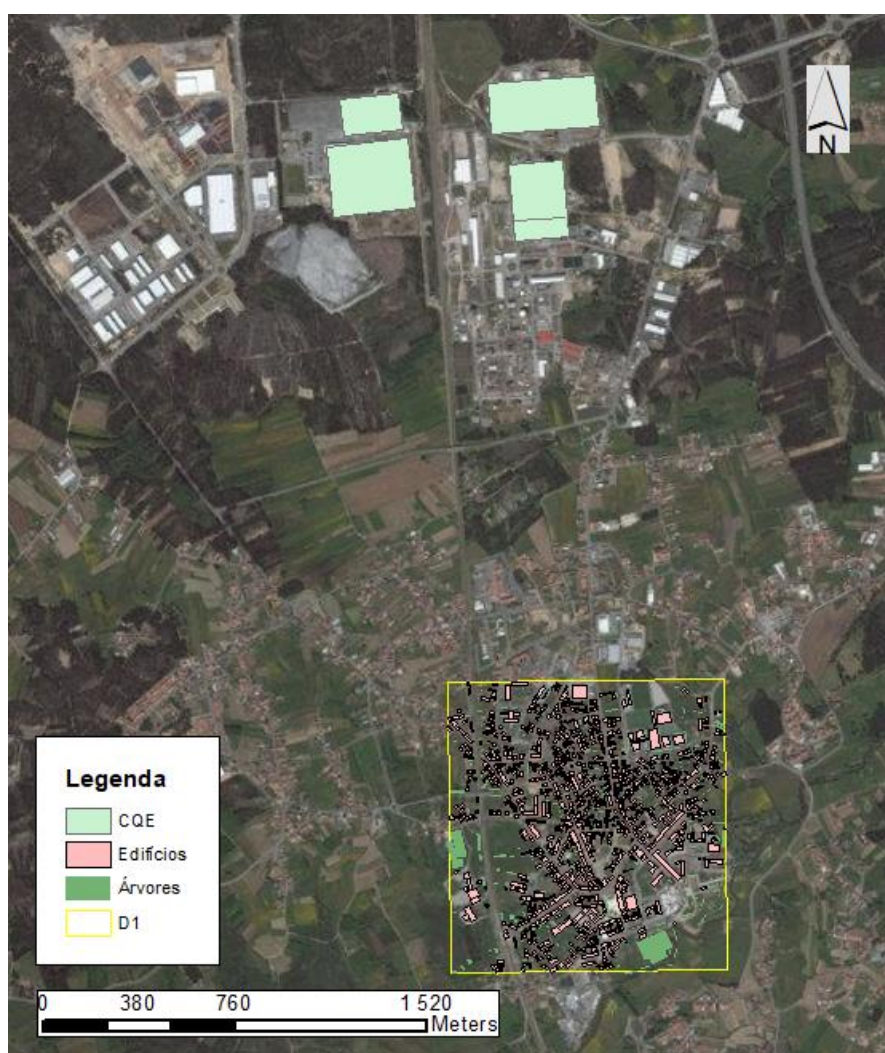


Figura 18- Domínio de simulação D2 processado em ArcGIS

Como já foi referido anteriormente, para comparar as duas localizações da estação de monitorização foi necessário criar dois subdomínios do domínio D1 de modo a analisar mais em pormenor o que acontece em cada localização e assim conseguir ter uma base de comparação entre ambas. No Anexo A é possível verificar a localização de ambas as regiões no domínio D1.

Com isto, desenvolveu-se o domínio, representado tridimensionalmente na Figura 19 a região da Escola Secundária de Estarreja que corresponde à localização atual da EMQA e a região de Estarreja-Teixugueira que se encontra igualmente representada tridimensionalmente na Figura 20, correspondendo à localização antiga da EMQA.

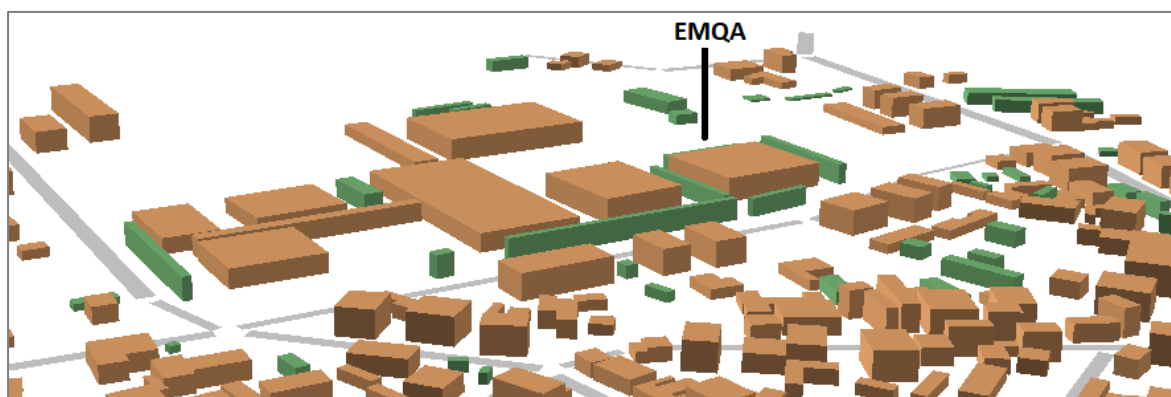


Figura 19- Representação tridimensional da atual localização da EMQA na Escola Secundária de Estarreja.

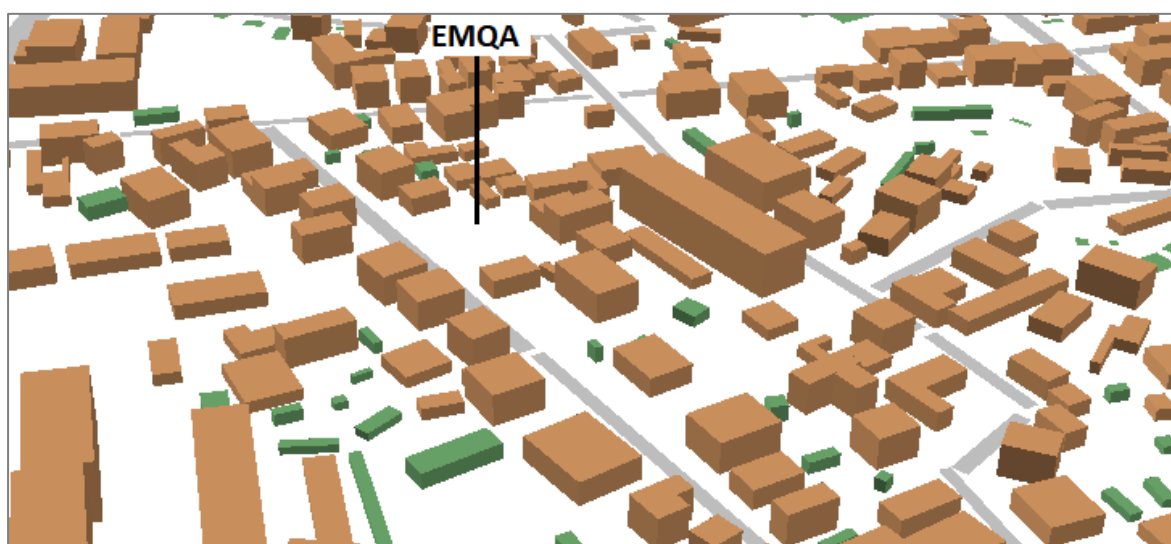


Figura 20- Representação tridimensional da antiga localização da EMQA em Estarreja- Teixugueira.

Analisando as representações tridimensionais dos dois locais é possível observar que a região de Estarreja-Teixugueira se encontra numa zona com maior densidade urbana em que se verifica que a estação neste local é rodeada por um elevado número de edifícios, enquanto que comparativamente à localização da Escola Secundária, apesar de não existir tantos obstáculos no seu redor a estação encontra-se na proximidade dos grandes edifícios pertencentes à escola.

5. Resultados

As principais fontes influenciadoras da qualidade do ar em Estarreja que irão ser consideradas correspondem ao tráfego rodoviário, uma vez que Estarreja apresenta excelentes acessos e o Complexo Químico de Estarreja, o qual se encontra numa zona próximo do centro da cidade. O município também sofre, dependendo das condições meteorológicas e de dispersão, grande influência do transporte de massas de ar de regiões vizinhas. No entanto para este caso de estudo serão apenas consideradas estas fontes de emissão, apesar de existirem outras fontes significativas que afetam a qualidade do ar, como por exemplo a combustão residencial.

Para este caso de estudo, será feita a análise de partículas (PM_{10}) e de Óxidos de Azoto (NO_x). Recorreu-se à análise destes poluentes por terem um grande impacto na saúde humana e serem predominantemente emitidos por combustão, em que normalmente são associados a atividade industrial e tráfego rodoviário.

O objetivo principal do trabalho é de quantificar a contribuição de cada uma das fontes de emissão para a qualidade do ar na região. Neste trabalho, a análise foca-se na determinação da contribuição das fontes do tráfego rodoviário e industriais, por serem aquelas com mais impacto na qualidade do ar na região. Com isto, observa-se na Figura 21 o contributo por setor para NO_x e PM_{10} no concelho de Estarreja para o ano de 2015 efetuado com base no inventário nacional de emissões de 2015 da APA. Verifica-se que para NO_x a indústria é o setor com maior contribuição seguido dos transportes e para PM_{10} a maior contribuição é também proveniente da indústria e em seguida a combustão doméstica e residencial.

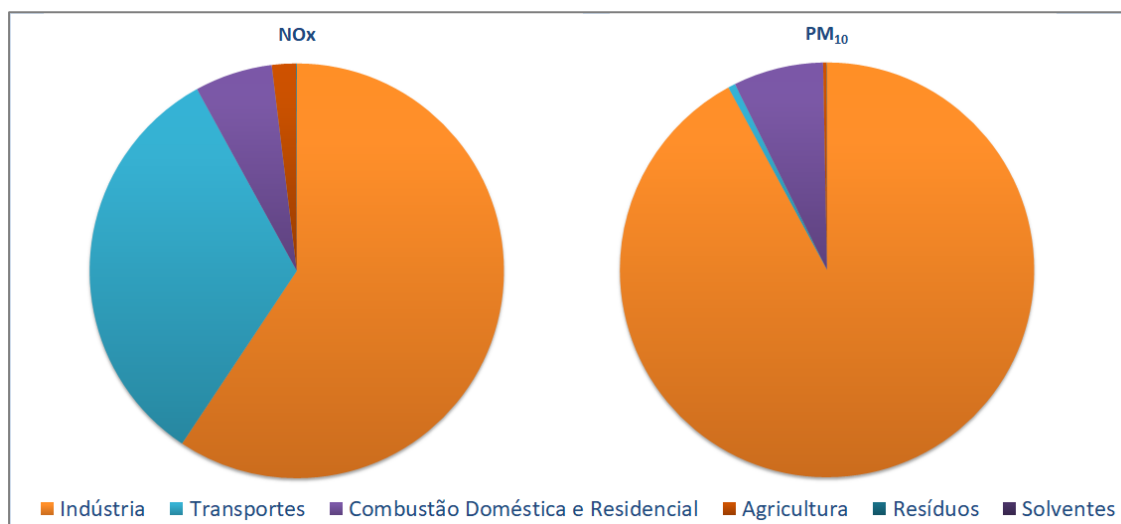


Figura 21- Contribuição por setor para o concelho de Estarreja no ano 2015 para NO_x e PM_{10} .

Na Tabela 7 encontram-se os valores usados na figura anterior, em que de modo a simplificar a análise ignoraram-se os setores sem contribuição registada no município de Estarreja, agregou-se no setor dos transportes o transporte rodoviário e o transporte ferroviário e agregaram-se no setor da agricultura as emissões da criação animal, cultivo e outras emissões diretas e indiretas provenientes da agricultura. Registou-se, para 2015, no concelho de Estarreja, emissões de NO_x num total de aproximadamente 0,978kt e aproximadamente 2,665kt de PM_{10} .

Tabela 7- Emissões por setor de NOx e PM10, em kt, para o ano de 2015 para o concelho de Estarreja.

Concelho	Ano	Setor	NOx (kt)	PM ₁₀ (kt)
Estarreja	2015	Indústria	0,580406	2,454773
		Transportes	0,319406	0,015191
		Combustão Doméstica e Residencial	0,059284	0,187297
		Agricultura	0,018285	0,007345
		Resíduos	0,000646	0,000644
		Solventes	0	0,000040
		Total	0,978027	2,665290

A combustão residencial é uma fonte importante de poluentes atmosféricos, nomeadamente de matéria particulada (PM), óxidos de nitrogénio (NOx), compostos orgânicos voláteis (COV) e monóxido de carbono (CO). Vários estudos apontam a combustão residencial, em particular a queima de madeira, como uma fonte de elevado impacto nos níveis de poluentes atmosféricos durante o inverno em muitas regiões da Europa [Silveira et al., 2017]. Em Portugal, estimava-se que a combustão da lenha era uma prática comum para cerca de 34% da população. Sendo que a emissão de PM₁₀ pela combustão doméstica representa 18% das emissões totais deste poluente, sendo assim um setor com impacto profundo nos níveis de PM₁₀ na atmosfera. Verificando-se igualmente os valores mais elevados no inverno e durante a noite, assim, é possível relacionar a combustão doméstica com o aumento de níveis registados no inverno [Borrego et al., 2010]. A metodologia para quantificar as emissões associadas à combustão residencial de biomassa é altamente complexa (por exemplo, poderia aplicar-se uma metodologia de desagregação das emissões por edifício, tendo por base os consumos de biomassa por município), sendo os dados necessários para aplicar a metodologia de difícil obtenção. Dada a complexidade associada a este ponto a combustão residencial de biomassa não foi considerada neste estudo, fazendo sentido ser alvo de trabalho futuro.

5.1 Avaliação dos Dados de Monitorização da Qualidade do Ar

Neste trabalho a análise foca-se em dois poluentes as partículas de diâmetro aerodinâmico inferior a 10 micrómetros (PM₁₀) e o dióxido de azoto (NO₂).

A análise da variação diária das médias horárias, ao longo dos anos, permite perceber o comportamento de cada estação e avaliar a sua classificação por tipo de influência e de ambiente [Monteiro, 2007]. Deste modo, com base nos dados de qualidade de ar fornecidos pela Agência Portuguesa do Ambiente elaboraram-se os gráficos com base nas médias horárias para as 3 estações existentes na região de Aveiro. Os valores das médias horárias de concentração por poluente foram calculados para os anos de 2014, 2015 e 2016.

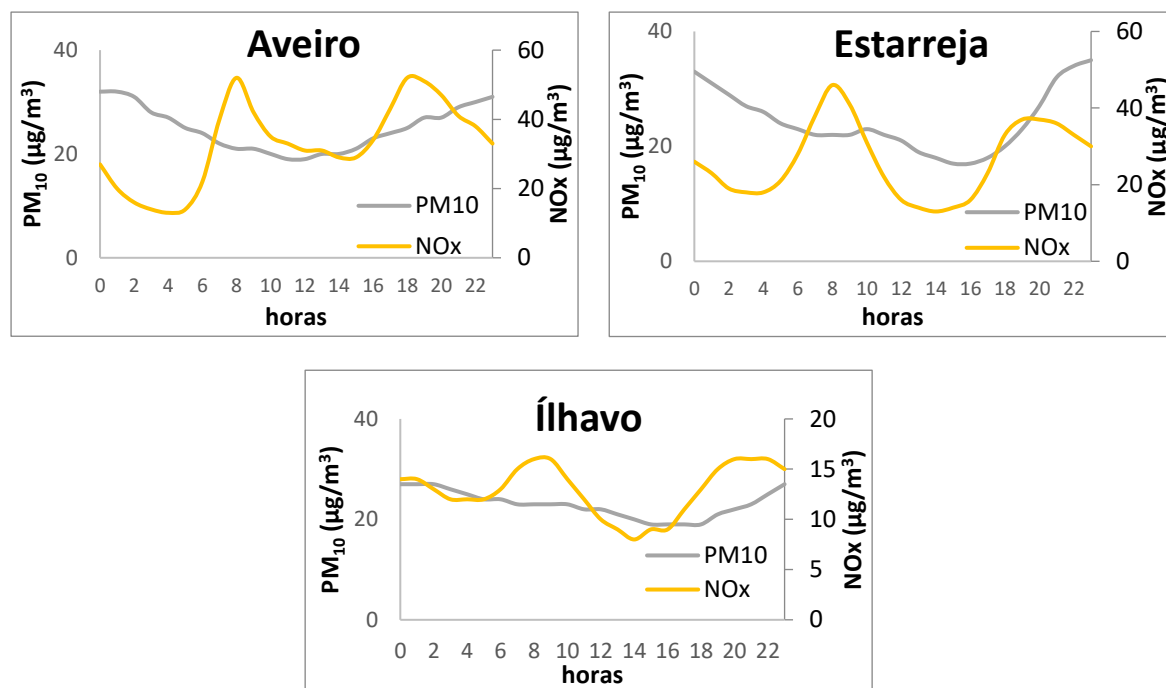


Figura 22- Evolução do perfil diário das médias horárias de NO_x e PM₁₀, durante os anos 2014-2016, para as estações de Aveiro, Estarreja e Ílhavo.

Como se pode observar na Figura 22, as três estações apresentam um comportamento de perfil diário de NO_x e PM₁₀ bastante semelhantes, contudo como seria de esperar para NO_x, em Aveiro e Estarreja os valores apresentados são superiores a Ílhavo uma vez que estas estações se apresentam em zonas com maior número de acessos para o tráfego rodoviário.

Uma vez que o setor dos transportes é dos que mais contribui nas emissões de NO_x, verifica-se esse mesmo comportamento no perfil horário, em que os máximos são atingidos nos períodos de maior trânsito, no período da manhã entre as 7h e as 10h e ao entardecer entre as 18h e as 21h. O perfil de Ílhavo não apresenta mudanças tão acentuadas por não apresentar um volume de tráfego tão elevado como as restantes estações representando assim um comportamento típico de uma estação de fundo. De acordo com a nova classificação da EMQA de Estarreja esta deveria apresentar um perfil semelhante ao da estação de Ílhavo.

Para as PM₁₀, observam-se nas três estações valores superiores no período noturno relativamente ao período diurno. Os valores baixos de PM₁₀ observados de dia podem ser justificados por uma maior dispersão de poluentes existente durante o período diurno. Contudo, este comportamento revela a presença de outras fontes emissoras de partículas, responsáveis pelos elevados valores registados durante a noite para além do tráfego rodoviário. A combustão residencial apresenta um peso significativo no inverno, correspondendo a 18% das emissões de PM₁₀ [Borrego et al., 2010].

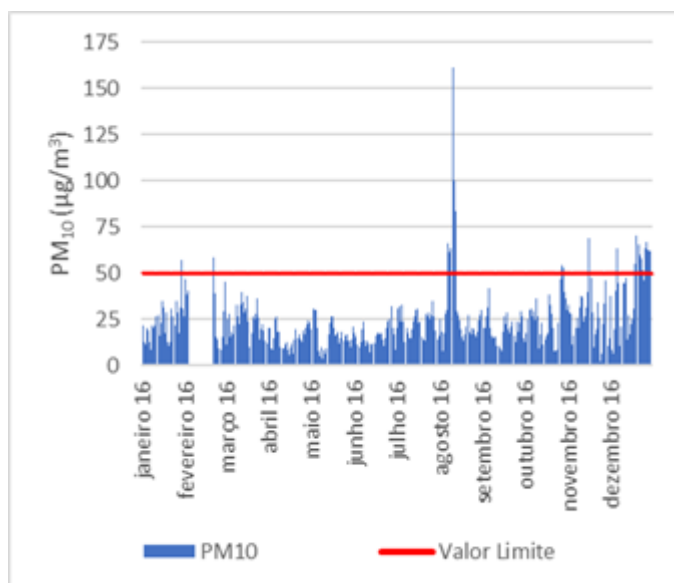


Figura 23- Concentração média diária de PM₁₀ em 2016 na estação de monitorização de Estarreja.

Como já foi referido previamente, as fontes naturais, tais como os incêndios e o transporte de massas do Norte de África apresentam um grande impacto nos níveis de partículas registados [Borrego et al., 2006; Reis et al., 2002]. Como possível exemplo, observam-se na Figura 23 os valores medidos na estação de Estarreja em 2016 são por norma superiores nos meses de inverno, mas é nos meses de verão em que os máximos são atingidos. Os valores máximos foram atingidos entre 8 e 11 de agosto, comparando os valores do ICNF (Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas) (2016), encontra-se uma

relação visto que se registavam um grande número de incêndios ativos na região e arredores. No dia 8 de agosto ocorriam incêndios em Águeda, onde ardeu uma área total 7342ha, em Arouca, em que ardeu um total 25116ha. No dia 10 de agosto, ocorriam incêndios em Sever de Vouga, resultando numa área total ardida de 1761ha, em Anadia, uma área total ardida foi de 2802ha e no dia 11 de agosto ocorria um outro incêndio em Sever de Vouga onde ardeu uma área de 2280ha.

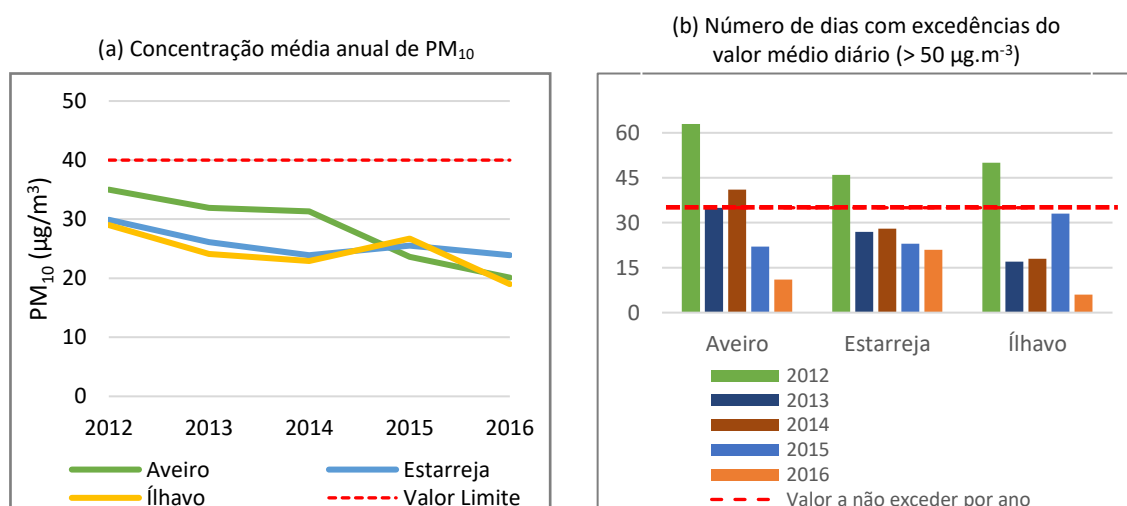


Figura 24- Comparação entre a média anual (a) e o número de dias excedidos do valor limite diário (b) de PM₁₀ para as estações da região de Aveiro entre os anos 2012 e 2016

Segundo a Figura 24, em (a) verifica-se o cumprimento da legislação em todas as estações no período analisado relativamente ao valor de concentração média anual de PM₁₀, observando-se também em todas as estações uma descida dos valores entre 2012 e 2014. Houve um aumento na estação de Estarreja e Ílhavo entre 2014 e 2015 e depois nova descida em 2016. Em (b) constata-

se que em 2012 todas as estações ultrapassaram o valor limite de excedências que corresponde a 35 dias (valor definido pela legislação atualmente em vigor), sendo que a estação de Aveiro em 2013 registou 35 dias a exceder os $50 \mu\text{g.m}^{-3}$ e em 2014 voltou a exceder o limite. A estação de Estarreja e Ílhavo após 2012 não voltaram a apresentar excedências no número de dias, no entanto, em Ílhavo registou-se um valor muito elevado em 2015.

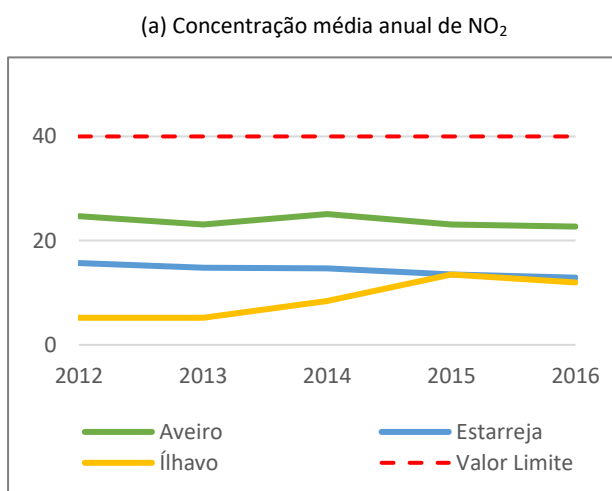


Figura 25- Comparação entre a média anual de NO_2 para as estações da região de Aveiro entre os anos 2012 e 2016.

Na Figura 25, encontra-se representado as concentrações anuais de NO_2 para as estações da região de Aveiro. No entanto é de referir que para Estarreja e Ílhavo, em 2016, os valores obtidos não podem ser tidos como válidos devido ao facto de a taxa de eficiência de recolha de dados ter sido inferior a 85%, valor mínimo legalmente estabelecido, sendo que não permite tirar nenhuma conclusão para esse ano.

Entre o período de 2014 e 2016 não se verificaram quaisquer excedências dos valores de NO_2 nas estações. Na estação de Aveiro não se verifica nenhuma variação significativa ao longo dos anos, contudo na estação de Estarreja observa-se uma ligeira descida ao longo dos anos. Por fim, para a estação de Ílhavo verificou-se um aumento bastante acentuado entre 2013 e 2015, tendo estado aparentemente estabilizado no ano 2016, contudo devido à baixa eficiência no registo de valores não se podem retirar conclusões, como foi previamente referido.

Relativamente ao número de excedências definido pelo Decreto-lei n.º 102/2010, não se verificou qualquer excedência entre 2012 e 2016 nessas estações, quer para o limiar de alerta (medido durante 3 horas consecutivas, estando estabelecido o valor de $400 \mu\text{g.m}^{-3}$), bem como como as excedências permitidas com base horária (não podendo ser excedidas 18 horas, com o valor estabelecido de $200 \mu\text{g.m}^{-3}$).

5.2 Análise do Escoamento Atmosférico

O parque meteorológico da Universidade de Aveiro possui duas estações meteorológicas automáticas (EMA702 e Torre), sendo que a torre meteorológica pertence à Universidade de Aveiro e é mantida pelo departamento de Física e pelo departamento de Ambiente e Ordenamento; a Estação Meteorológica Automática 702 (EMA702) integra a rede de Estações Meteorológicas Automáticas de Portugal e é mantida pelo IPMA. Como já foi referido previamente, uma vez que não existe acesso a dados meteorológicos em Estarreja, os dados necessários de entrada no modelo VADIS foram obtidos pela estação meteorológica pertencente à Universidade de Aveiro. A estação encontra-se em funcionamento desde 1996 e está equipada com sensores de precipitação, radiação, pressão, e vento a 10, 20 e 30 metros, todos com uma resolução temporal de 10 minutos. Os dados utilizados são referentes às medições efetuadas a 10m [URL11].

A escolha das características meteorológicas, intensidade e direção do vento, para as simulações foi feito tendo por base o cruzamento das informações recolhidas da normal climatológica de 1951-1980 e das velocidades, assim como frequências, medidas na torre meteorológica da Universidade de Aveiro.

Com base na normal climatológica de 1951-1980 da estação meteorológica da base aérea de S. Jacinto verificou-se que as frequências para ventos de norte (N) e noroeste (NW) eram respetivamente de 26,82% e 14,60%, e para ventos de sudeste (SE) de 9,55%, sendo estas direções as de maior frequência. Apesar da normal climatológica não apresentar valores subdivididos para os pontos subcolaterais, esta permite ter um conhecimento do comportamento dos ventos nestes quadrantes. Analisando a rosa dos ventos do período entre 2006 e 2013 apresentada na caracterização meteorológica da CIRA no Capítulo 3 (Figura 9) verifica-se, que à semelhança da normal climatológica, os ventos são predominantes no segundo e quarto quadrante, com as maiores frequências de ocorrência registadas, no quarto quadrante, para NNW e, no segundo quadrante, para SE. Assim, escolheu-se para as simulações, ventos com direções de NNW e SE.

As velocidades do vento de 2 m.s^{-1} e 5 m.s^{-1} foram selecionadas como sendo representativas do caso de estudo, tendo por base a frequência de ocorrência indicada pela rosa dos ventos de Aveiro. Optou-se por simular com diferentes direções e intensidades de modo a analisar a influência da meteorologia na qualidade do ar da área em estudo.

Para facilitar a interpretação das figuras, as EMQA foram identificadas por dois hexágonos, o hexágono vermelho corresponde à antiga localização da EMQA de Estarreja-Teixugueira e o hexágono roxo corresponde à estação atual instalada na Escola Secundária de Estarreja.

A Figura 26 e Figura 27 apresentam os campos de vento obtidos para o domínio D1 pelo módulo FLOW do modelo VADIS, com a direção de vento de NNW e velocidades, respetivamente, de 2 m.s^{-1} e 5 m.s^{-1} .

Para a Figura 26 verifica-se que não existe situações de grande anormalidade, contudo existem pequenas zonas, principalmente a norte do domínio, em que os valores atingidos são mais elevados comparativamente às condições de vento iniciais. Para essas zonas observam-se valores na ordem dos 5 m.s^{-1} e que os valores de intensidade do vento são máximos na Escola Secundária de Estarreja em que chegam a atingir 9 m.s^{-1} .

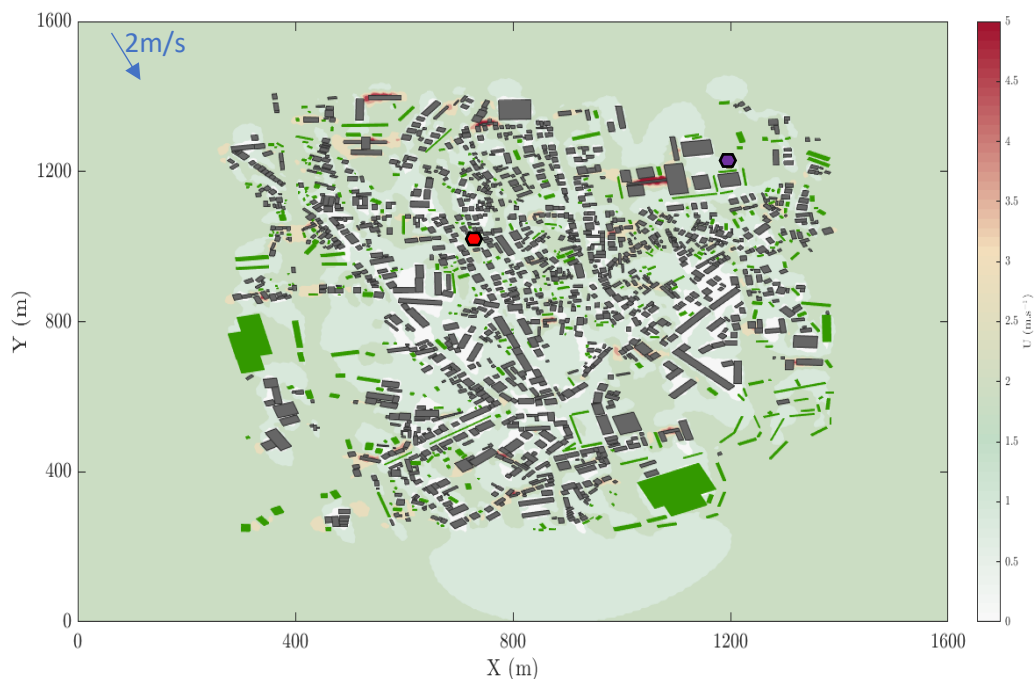


Figura 26- Representação do campo de ventos para condições iniciais de vento com direção de NNW e velocidade de 2 m.s^{-1} sob o domínio D1.

Para a Figura 27, ao invés do verificado na figura anterior, observa-se a existência de diferentes zonas em que se apresentam valores superiores ao valor da condição inicial. Para esta situação registam-se velocidades muito elevadas, superiores a 12 m.s^{-1} em diversas zonas e regista-se um máximo de 18 m.s^{-1} na Escola Secundária.

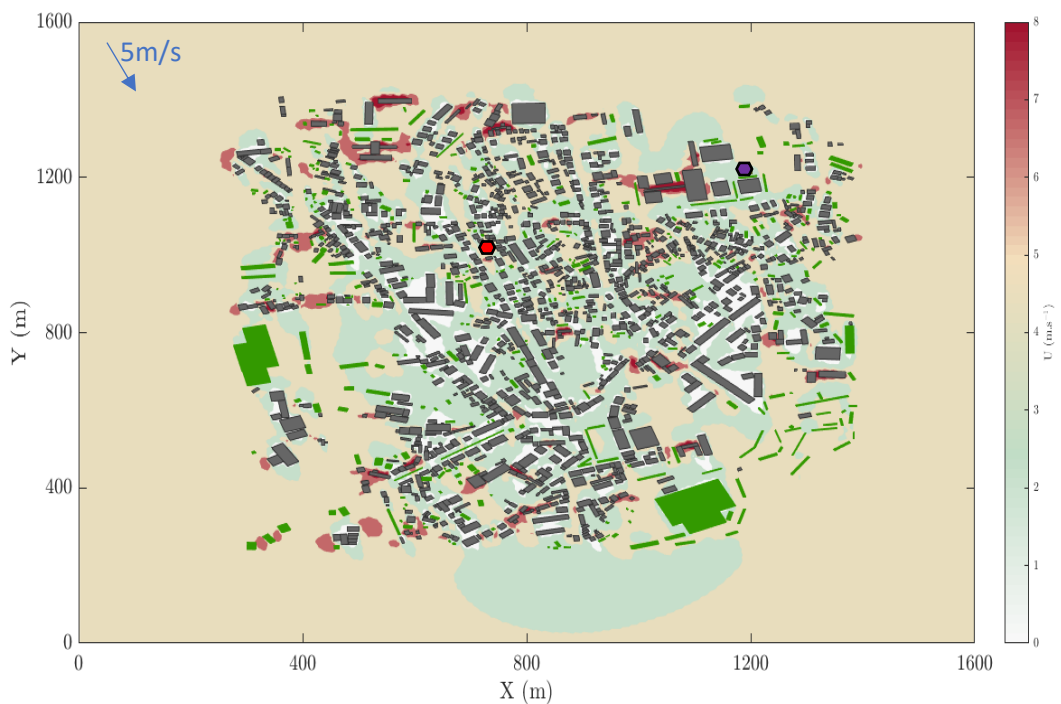


Figura 27- Representação do campo de ventos para condições iniciais de vento com direção de NNW e velocidade de 5 m.s^{-1} sob o domínio D1.

Na Figura 28 e a Figura 29 encontram-se a representação dos campos de vento obtidos para o domínio D1 para a direção de vento de SE e velocidades de 2 m.s^{-1} e 5 m.s^{-1} , respetivamente.

Na Figura 28 comparativamente ao campo de ventos apresentado previamente para a mesma intensidade de vento, mas para a direção de NNW verifica-se que neste caso existe um menor número de zonas em que se registam valores superiores às condições de entrada. Destacando-se assim unicamente a região da Escola Secundária, em que se verifica uma área significativa com valores superiores às condições iniciais de entrada. Registam-se valores na ordem dos 9 m.s^{-1} e um máximo de 11 m.s^{-1} .

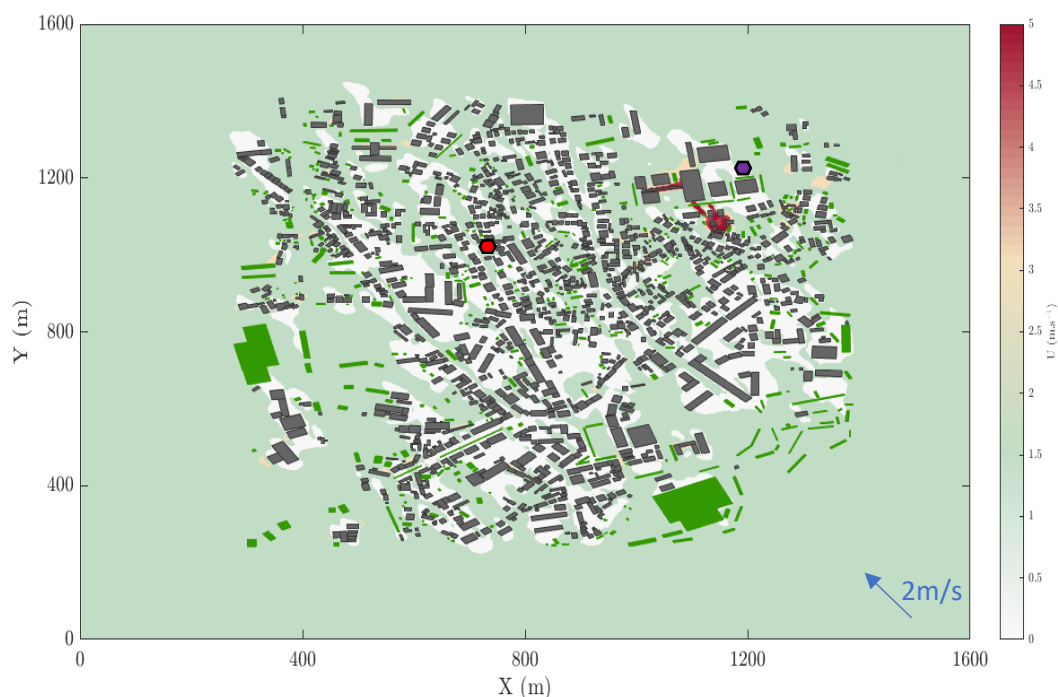


Figura 28- Representação do campo de ventos para condições iniciais de vento com direção de SE e velocidade de 2 m.s^{-1} sob o domínio D1.

Na Figura 29, observa-se a existência de diversas zonas com velocidades superiores às condições iniciais de entrada um pouco por toda a área de estudo. Sendo que o valor máximo atingido é de aproximadamente 12 m.s^{-1} valor este registado em diversos pontos do domínio.

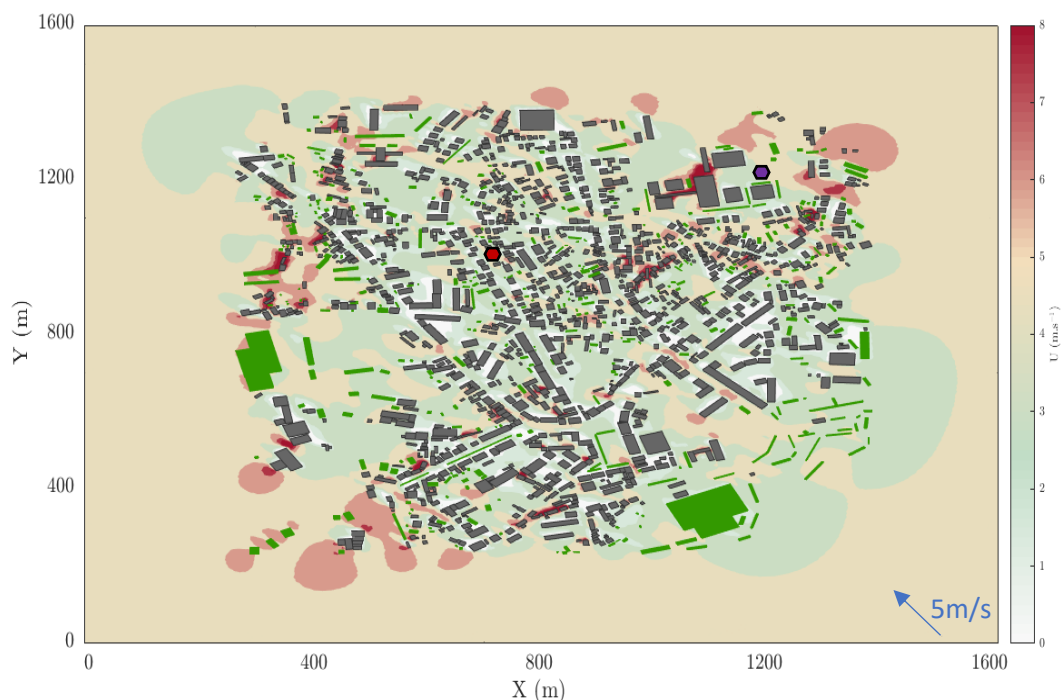


Figura 29-Representação do campo de ventos para condições iniciais de vento com direção de SE e velocidade de 5 m.s^{-1} sob o domínio D1.

A partir da análise destas figuras observa-se que devido à configuração e altura dos edifícios da Escola Secundária esta apresenta sempre regiões com valores superiores aos valores das condições iniciais de entrada. Para a EN 109, sendo esta a estrada de maior importância no domínio, observa-se que, em regra geral, esta não apresenta pontos de velocidades superiores às condições de entradas e que na maioria do seu comprimento as velocidades são inferiores.

Para avaliar as perturbações induzidas pelos diferentes obstáculos no escoamento das áreas envolventes à estação antiga de Estarreja-Teixugueira e à estação atual na Escola Secundária de Estarreja são apresentadas mais em pormenor com a representação das intensidades dos ventos.

Na Figura 30 é possível observar, a título de exemplo, o comportamento do escoamento para a região de Estarreja-Teixugueira para ventos com direção NNW e intensidade de 5 m.s^{-1} , sendo que as representações para as restantes variáveis se encontram no Anexo B. Sendo esta uma região com elevado número de edifícios observa-se que em algumas zonas o escoamento é significativamente influenciado pelos obstáculos presentes.

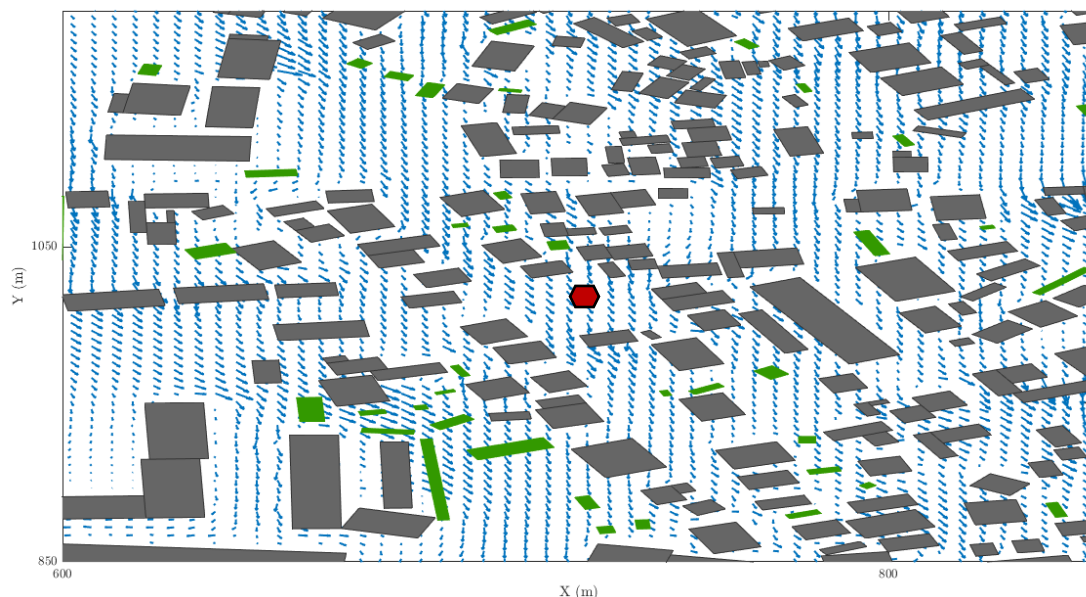


Figura 30- Representação da direção do escoamento para condições iniciais de vento de NNW e intensidade de 5 m.s^{-1} na área de Estarreja-Teixugueira.

Na Figura 31 apresenta-se, para as diferentes condições de ventos analisadas, o escoamento ao pormenor da estação de Estarreja-Teixugueira.

Observa-se que de modo geral, para as diferentes condições, não se verificam efeitos no escoamento muito complexos. Assim, a EMQA localiza-se numa zona em que os edifícios circundantes provocam uma diminuição da intensidade do vento levando assim a valores um pouco inferiores às condições iniciais de vento. Contudo, verifica-se que para ventos de intensidade de 5 m.s^{-1} ocorre o surgimento de alguma zonas com velocidades superiores, atingindo em algumas regiões 8 m.s^{-1} no entanto estes encontram-se afastados da EMQA não existindo qualquer influência sobre a mesma.

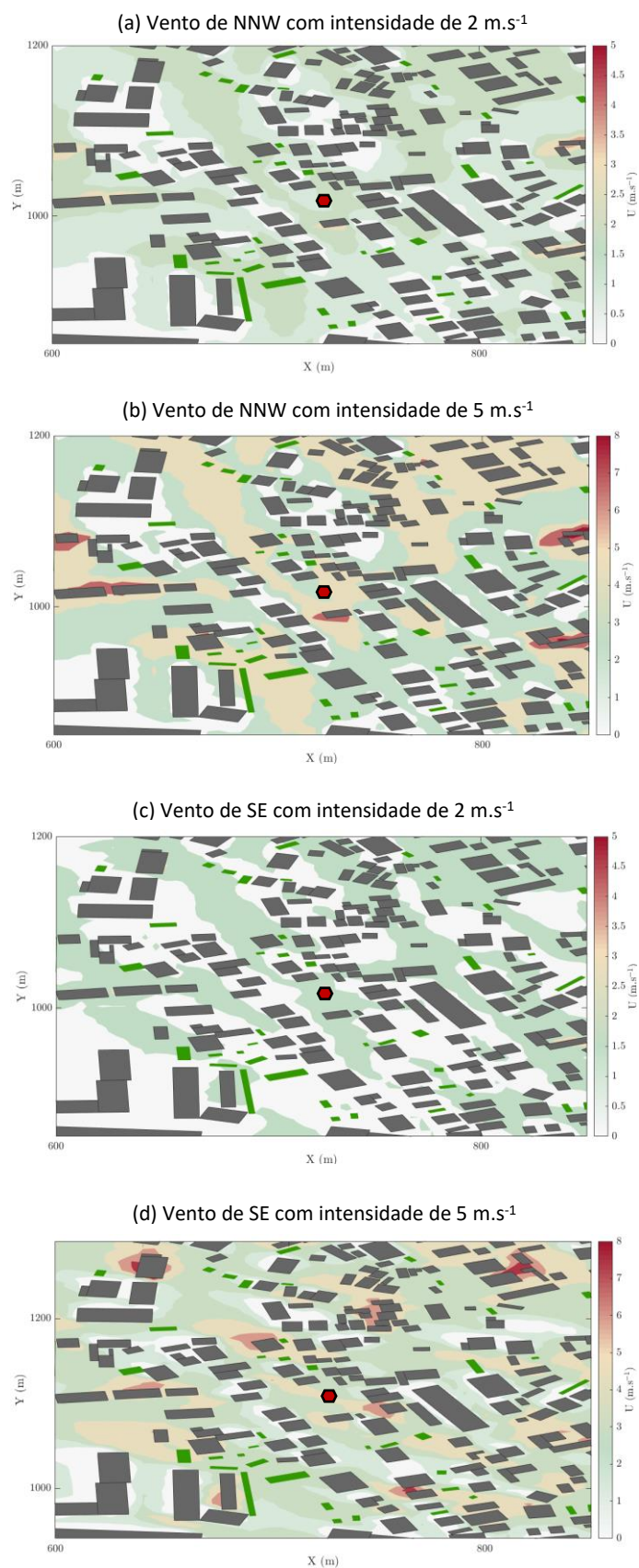


Figura 31- Representação dos ventos (com diferentes direções e intensidades) na zona da antiga estação de Estarreja-Teixugueira.

Na Figura 32 encontra-se representadas as direções do escoamento nas proximidades à Escola Secundária de Estarreja para ventos de NNW e 5 m.s^{-1} , sendo que a representação das restantes direções e intensidades se encontram igualmente no Anexo B. Com base nesta representação, verifica-se que em diversas zonas a configuração e altura dos edifícios tem grande influência no escoamento, sendo particularmente evidente junto dos edifícios da Escola Secundária.

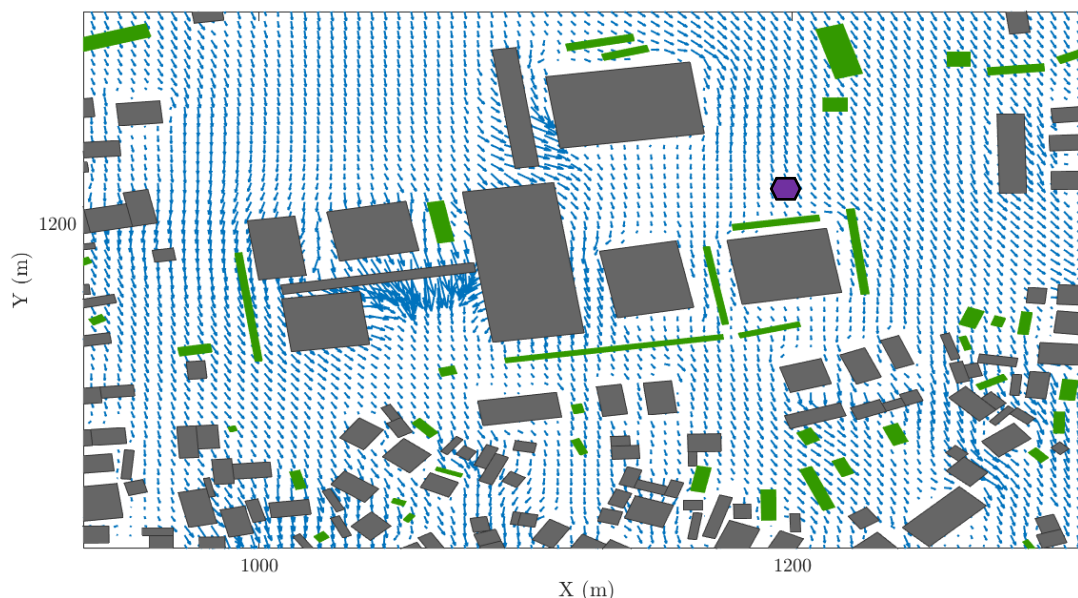


Figura 32-Representação da direção do escoamento para condições iniciais de vento de NNW e intensidade de 5 m.s^{-1} na área da Escola Secundária.

Na Figura 33, à semelhança do caso anterior, observam-se as representações dos ventos para as diferentes variáveis em estudo, mas para a localização atual, correspondendo à estação na Escola Secundária de Estarreja. Verifica-se que para as diferentes condições de ventos os valores máximos de intensidade são atingidos no edifício da Escola Secundária. Contudo, observa-se igualmente que os pequenos aglomerados de obstáculos juntamente com a presença de edifícios maioritariamente de dois andares ou superiores, levam à criação de diversas zonas em que se registam velocidades superiores às condições iniciais. Provando assim que esta região possui um escoamento muito particular e bastante irregular, no entanto a EMQA encontra-se de certo modo protegida pelos edifícios e árvores da Escola Secundária o que leva a que se registem, para as diferentes condições simuladas, valores inferiores às iniciais.

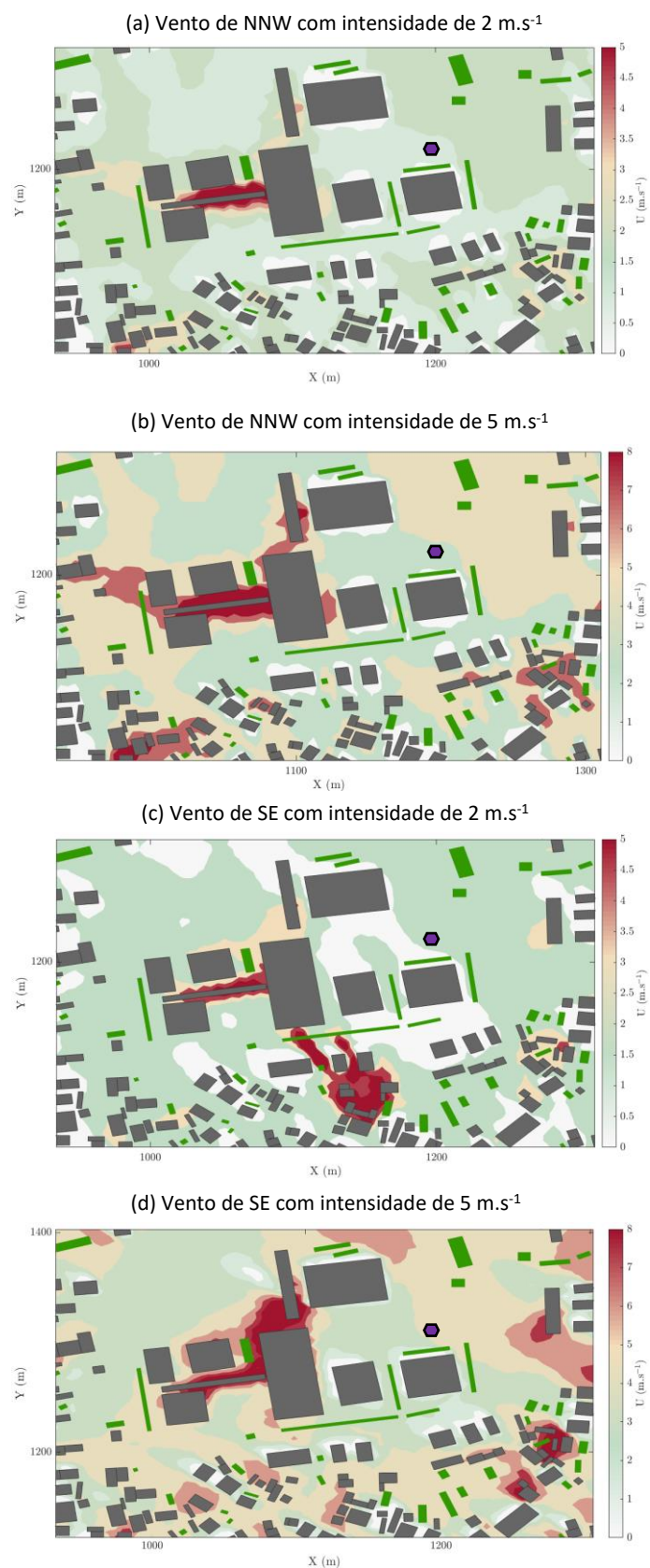


Figura 33- Representação dos ventos (com diferentes direções e intensidades) na zona da estação da Escola Secundária de Estarreja.

Na tabela seguinte encontram-se os valores de velocidade do vento, em m/s, junto da EMQA para as diferentes condições simuladas na região de Estarreja-Teixugueira e na região da Escola Secundária de Estarreja.

Tabela 8- Valores de intensidade do vento simulados, em m/s, na localização antiga e atual da EMQA para diferentes condições iniciais de entrada.

Condições iniciais de entrada do vento		Localização da EMQA	
Direção	Intensidade (m/s)	Estarreja-Teixugueira (localização antiga) (m/s)	Escola Secundária de Estarreja (localização atual) (m/s)
NNW	2	1,8	1,6
	5	4,8	4,1
SE	2	1,6	2,2
	5	4,5	5,3

Com base nos valores obtidos (Tabela 8) verifica-se que de facto existe influência dos obstáculos circundantes à EMQA nas duas regiões. Comparando ambas as estações observa-se que para ventos com direção de NNW, ventos típicos, os valores são superiores na localização de Estarreja-Teixugueira contudo para os ventos de SE verifica-se que os valores são superiores na Escola Secundária de Estarreja. De modo geral, em ambas as localizações registam-se valores inferiores às condições de entrada, exceto para ventos de SE e intensidade 5 m.s^{-1} no local da Escola Secundária, em que o valor é ligeiramente superior à condição de entrada.

5.3 Emissões

5.3.1 Tráfego Rodoviário

As fontes móveis emitem poluentes resultantes do processo de combustão nos motores. Estas fontes são responsáveis por cerca de 40–60% de todas as emissões de NO_x e cerca de 10-30% de toda a matéria particulada (PM_{2.5} ou menor que 2.5µm em diâmetro) emitida nas diferentes partes do território da ECE (Economic Commission for Europe) no ano de 2010 [UNECE, 2016].

Sendo que o setor rodoviário representa uma parcela significativa das emissões antropogénicas, sendo uma das principais fontes de poluição do ar em áreas urbanas, é assim essencial o desenvolvimento de uma abordagem com vista à compreensão da pressão ambiental induzida pelo tráfego rodoviário, de modo a quantificar com maior precisão possível a quantidade de poluentes emitidos pelos veículos para a atmosfera. Para este propósito, neste trabalho recorreu-se ao modelo TREM (Transport Emission Model for Line Sources) [DAO, 2007]. Este modelo tem como base a metodologia MEET/COST. A versão do modelo TREM utilizada para este caso de estudo recorre à metodologia do guia prático de 2016 “EMEP/ EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016”.

De um modo geral, a estimativa de emissões é baseada na seguinte equação:

$$E = fe * a$$

Onde, “E” é a quantidade de emissão, “fe” é o fator de emissão por unidade de atividade, e “a” é a quantidade de atividade de transporte. Esta equação deve ser aplicada para cada categoria de veículo, uma vez que os fatores de emissão e a atividade são diferentes. O fator de emissão “fe”, geralmente expresso em g.km^{-1} , encontra-se relacionado com as condições de condução e com o tipo de veículo. A atividade “a” resulta do produto entre o número de veículos para cada uma das categorias e da distância percorrida pelo veículo ao longo da unidade de tempo, em km [DAO, 2007].

O modelo de emissão precisa de um conjunto de dados relacionados com as características do tráfego, mas também de dados adicionais como a temperatura do ar e as propriedades dos veículos para serem utilizados nos cálculos. Para cada segmento rodoviário são necessários os seguintes dados:

- Volume de tráfego rodoviário
- Velocidade de circulação dos veículos
- Distribuição de veículos por categorias (diesel ou gasolina; mota, ligeiro ou pesado; etc.)
- Distribuição de veículos por classes (com base na idade e tecnologia do veículo)
- Comprimento do segmento rodoviário

Na ausência de informação, a mesma distribuição de veículos por categorias e por classes pode ser considerada para todas as estradas. Os dados de tráfego rodoviário são muito escassos e de difícil obtenção, principalmente para regiões fora dos grandes centros urbanos, assim, a informação detalhada requerida pelo modelo, representa um grande entrave e uma fonte de incerteza nas estimativas obtidas.

Uma das principais limitações do modelo TREM prende-se ao facto do modelo apenas calcular as emissões originadas pelo escape dos veículos, não considerando as emissões provenientes da ressuspensão e do desgaste, nomeadamente dos travões, pneus e pavimento da estrada, denominadas emissões não exaustivas. A ressuspensão da poeira da estrada resulta então da turbulência gerada pelos veículos ou pelo vento, representando uma das principais fontes não exaustivas em meio urbano. [Guttikunda, 2008; Denier van der Gon et al., 2013; Alves et al., 2018].

À medida que as emissões de gases de escape do motor decrescem como resultado dos limites estabelecidos pelos padrões da UE e melhoria da tecnologia automóvel estima-se que, as emissões não-exaustivas juntamente com a ressuspensão induzida pelo tráfego possam contribuir com até 50% das emissões de PM_{10} no tráfego rodoviário local. Os valores de emissões não exaustivas são superiores nas regiões com climas mais secos [Johansson et al., 2007; Bukowiecki et al., 2010; Denier van der Gon et al., 2013; Alves et al., 2018]. Aponta-se que até 2020, no setor rodoviário, as emissões de partículas não exaustivas ultrapassem as partículas exaustivas. [Rexis et al., 2009; Alves et al., 2018].

Para este caso de estudo, as informações necessárias de input no modelo, como por exemplo, o volume de tráfego que foram obtidas por contagem direta, por análise aos relatórios da CM de Estarreja do Mapa de Ruído de 2009, do Plano Municipal de Ruído da CM de Estarreja de

2015, dos relatórios do Instituto de Mobilidade e dos Transportes (IMT) e para as restantes vias, às quais não foi possível obter informações, recorreu-se a estimativas. As estimativas surgiram principalmente do conhecimento da região e com base a aproximações das vias às quais o volume de tráfego era conhecido. As contagens foram efetuadas nas ruas adjacentes à Escola Secundária para diversas horas (8h às 14h e das 16h às 19h), em dias da semana no mês de março. Este local foi escolhido por ser um foco importante do trabalho, sendo que para trabalhos futuros, de modo a reduzir incertezas, seria importante caracterizar um maior número de vias com base na contagem direta, que por limitações temporais não foi possível neste trabalho.

Na Figura 34, é possível observar o modo de obtenção da informação utilizada no modelo por troço de estrada.

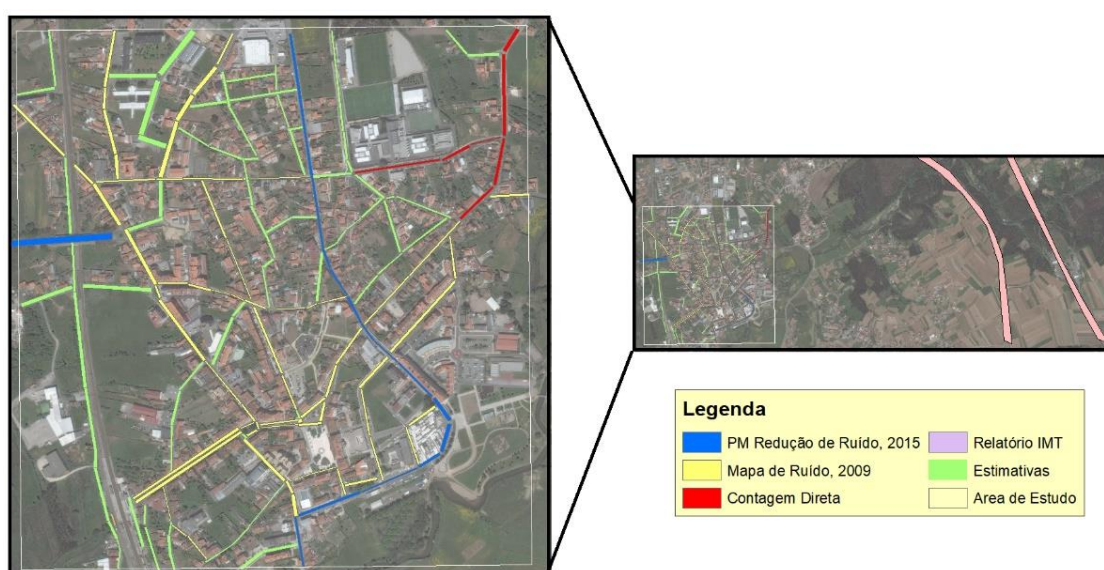


Figura 34- Esquema da metodologia estabelecida para obtenção dos dados de tráfego por segmento de via.

A partir do mapa de ruído do município de Estarreja (Figura 35) é possível ter uma ideia das ruas mais movimentadas, sendo que esta é uma importante ferramenta na gestão dos municípios.

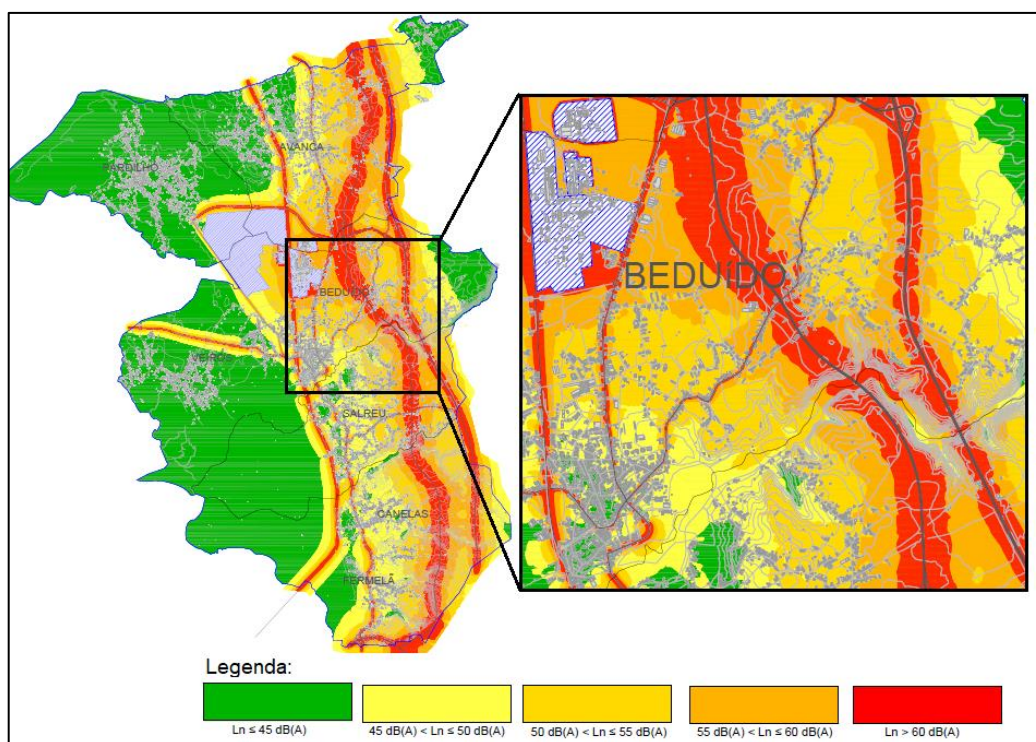


Figura 35- Mapa de Ruído do concelho de Estarreja de 2014.

Para a distribuição temporal dos dados de tráfego foi utilizado o perfil temporal do inventário EMEP/EEA de emissões de poluentes. De modo a simplificar, uma vez que o período de simulações incide unicamente em dias da semana, assim optou-se por padronizar num único perfil para todos os dias da semana. Apesar de existirem algumas diferenças por dia da semana, obteve-se o seguinte perfil temporal representado na Figura 36.

De modo a desagregar o valor do tráfego médio diário (TMD) por cada hora recorreu-se ao perfil diário e aplicou-se a seguinte equação 7. Em que i é a hora do dia, TMD é o valor do tráfego médio diário e f_i corresponde ao valor do fator do perfil diário.

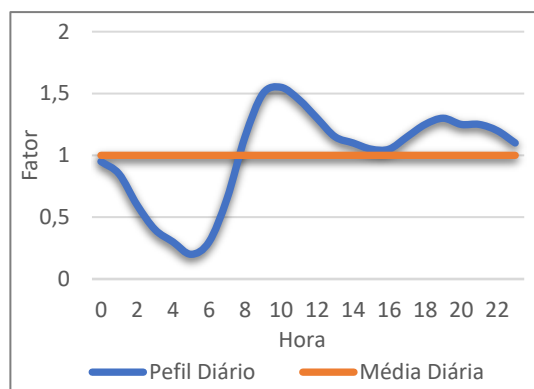


Figura 36- Perfil diário de tráfego rodoviário num dia da semana.

$$\text{Contagem}_i = TMD + (f_i - 1) * TMD \quad [\text{Equação 7}]$$

Para efetuar a caracterização da frota de veículos no concelho de Estarreja, recorreu-se a base de dados do COPERT para Portugal (ver Anexo C). A informação relativamente à velocidade de circulação dos veículos por estrada foi retirada dos relatórios previamente referenciados.

Para a simplificação no caso de estudo assumiu-se, no modelo TREM, unicamente emissões a quente. Relativamente ao comprimento dos segmentos rodoviários, recorreu-se às potencialidades do ArcGIS para obter o comprimento por troço da área de estudo.

Com o intuito de avaliar o impacto do tráfego rodoviário em diferentes condições recorreu-se a taxas de emissão de tráfego para períodos de elevada emissão (10h, período em que o volume de carros é máximo) e para períodos de baixa emissão (às 5h, período em que o volume de carros é mínimo). A escolha destes períodos foi feita com base no gráfico da Figura 36 no qual se observa que o fator é máximo para as 10h e mínimo para as 5h, correspondendo assim, respetivamente, ao período com volume de tráfego rodoviário máximo e mínimo.

Na Figura 37, encontram-se representadas as taxas de emissões por via, em g/km, obtidas pelo modelo TREM para o NO_x para um período de tráfego intenso (10h). Na análise à figura verifica-se que a estrada com maior taxa de emissão é a A1 com o valor de 1190 g/km. No entanto, para as vias presentes na área de estudo regista-se que a via com maior taxa de emissão corresponde à EN109 com 464 g/km a qual possui um valor mais elevado relativamente à A29, a qual regista 417 g/km.

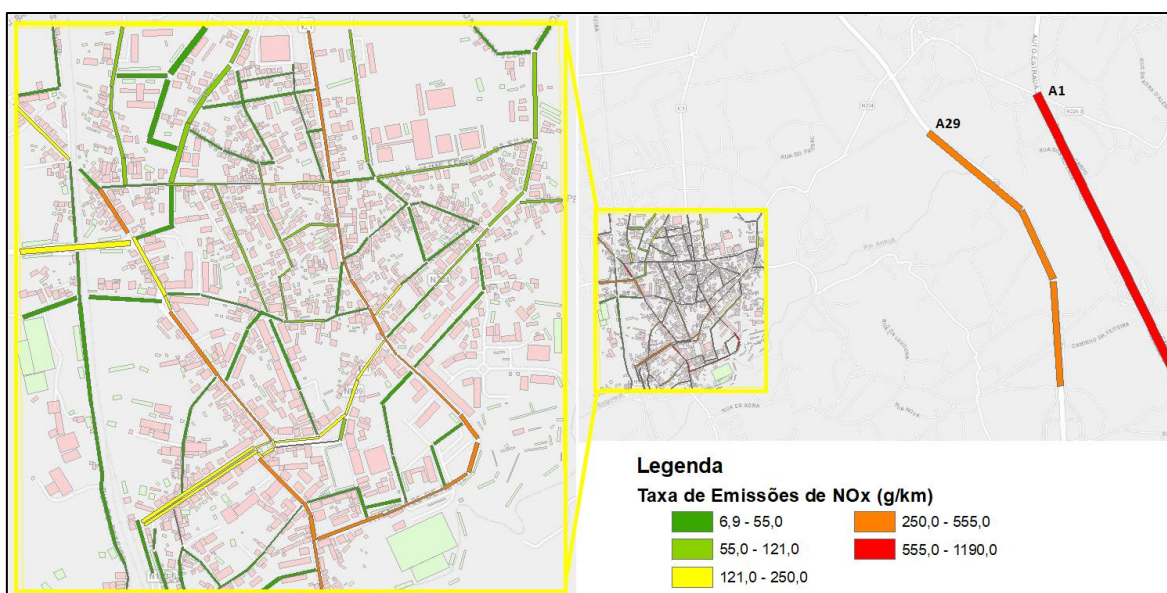


Figura 37- Representação da taxa de emissões por via, em g/km, para NO_x num período de intenso tráfego rodoviário (10h).

Na Figura 38, encontram-se representadas as taxas de emissões por via, em g/km, obtidas pelo modelo TREM para PM₁₀ para um período de tráfego intenso (10h). Para as PM₁₀ observa-se que a A1 apresenta o valor máximo de emissões com 54,7 g/km seguido da EN109 com 28,6 g/km.

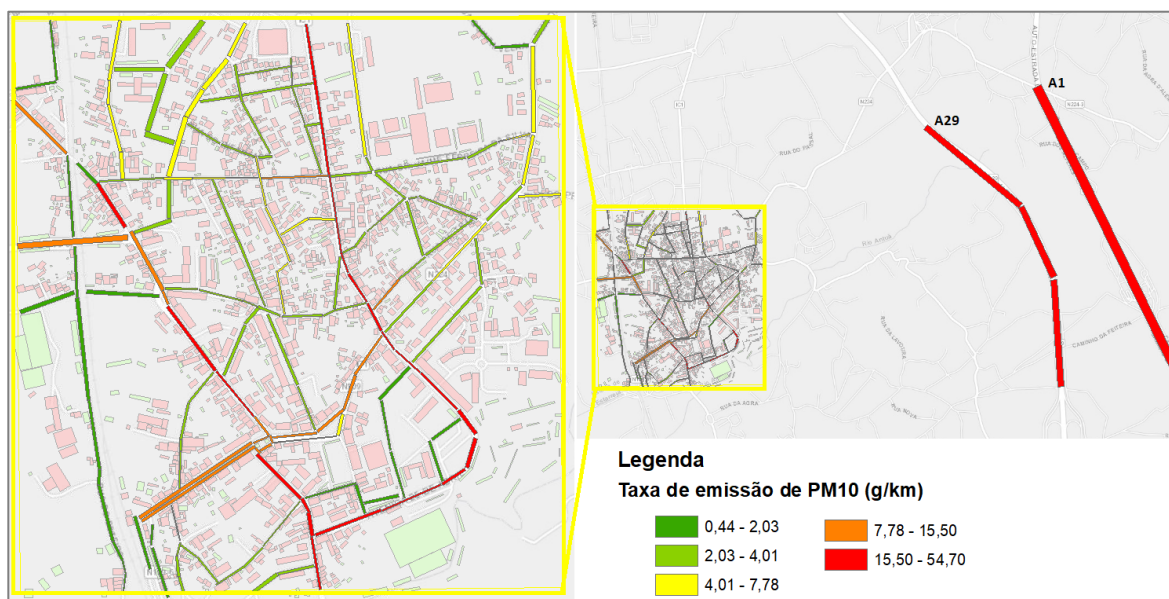


Figura 38-Representação da taxa de emissões por via, em g/km, para PM₁₀ num período de intenso tráfego rodoviário (10h).

As taxas de emissão por via, em g/km, para o período de baixa emissão (5h) podem ser observadas no Anexo D, assim como a diferença para cada via do domínio entre os valores de baixa e elevada emissão. A via mais relevante no domínio D1 corresponde à EN109 e verificam-se grandes variações entre os dois períodos de tráfego considerados. Sendo que para esta mesma via, regista-se um aumento de 350 g/km para NO_x e de 21,48 para PM₁₀ para o período de elevada emissão relativamente ao período de baixa emissão.

Com estes valores é possível encontrar uma relação com o mapa de ruído de Estarreja em que as vias com maior intensidade de ruído se traduzem, como esperado, nas vias com maior tráfego rodoviário e consequentemente nas vias com maiores taxas de emissões.

5.3.2 Indústria

Em resposta às preocupações da população e para uma maior abertura e aproximação à comunidade, foi criado o Painel Consultivo Comunitário do Programa Atuação Responsável de Estarreja (PACOPAR), grupo constituído pelas empresas químicas do complexo, por cidadãos e por representantes de diversas entidades do concelho, nomeadamente, a câmara municipal de Estarreja, escolas, GNR, bombeiros e outras entidades. O PACOPAR surgiu em compromisso com a comunidade local para melhorar a qualidade de vida em Estarreja, aplicando os compromissos de atuação responsável. As empresas



Figura 39- Localização geográfica do Complexo Químico de Estarreja.

químicas do PACOPAR continuam com um bom desempenho em termos de segurança, mantendo-se praticamente todas sem acidentes. Estes indicadores revelam a continuidade do enfoque das empresas na prevenção da ocorrência de acidentes, quer através de melhorias tecnológicas implementadas no processo produtivo, quer de formação para a segurança e adoção de métodos de trabalho mais seguros. Na globalidade, a nível ambiental, o CQE continua a manter os níveis de descida que se fizeram sentir desde há cerca de três anos, nos indicadores de emissões de poluentes para a atmosfera, resíduos sólidos e consumos [PACOPAR, 2016].

Como já foi referenciado, a indústria tem um impacto significativo no desenvolvimento económico e, em consequência, na qualidade do ar da região. O foco principal nas emissões industriais do concelho de Estarreja é proveniente do Complexo Químico de Estarreja (CQE). Sendo que as fontes pontuais consideradas para o caso de estudo correspondem às empresas químicas:

- Air Liquide
- Aliada Química de Portugal (AQP)
- CIRES
- CUF
- DOW

Por uma limitação na disponibilidade de valores de emissões de outras fontes pontuais que poderiam ter igualmente algum peso no domínio de simulação, o valor das emissões corresponderá apenas aos valores emitidos pelas empresas do CQE. Contudo verificou-se, com base em inventários para o município, que estas empresas são representativas da indústria da região uma vez que correspondem a grande parte das emissões totais deste setor.

Tabela 9- Emissões de Partículas e Óxidos de Azoto por empresa para o ano de 2015 e 2016 [Fonte: PACOPAR, 2016].

Empresa	Partículas (t/ano)		Óxidos de Azoto (t/ano)	
	2015	2016	2015	2016
Air Liquide	2	2	22	22
AQP	0,005	0,004	0	0
CIRES	10	3	10	7
CUF	6	1	33	37
Dow	16	11	181	112

Segundo o Plano Municipal de Redução de Ruído verificou-se que as potências sonoras calculadas para cada unidade industrial, para os períodos diurno, entardecer e noturno se mantêm constantes ao longo dos períodos. Assim, por falta de informação adicional relativamente às emissões, assumiu-se que as indústrias do complexo, excetuando as paragens que não coincidem com as datas pretendidas das simulações, trabalham interruptamente 24h todo o ano. Então a emissão anual total foi distribuída homogeneamente pelos 12 meses do ano, pelo número de dias de cada mês e pelas 24 horas de cada dia.

5.4 Padrões de dispersão de poluentes

No domínio D1 analisou-se o impacto do tráfego nas concentrações de NO₂ e PM₁₀. Nas figuras seguintes (Figura 40 à Figura 47) encontram-se os resultados da dispersão de NO₂ para um período de baixas emissões, às 5h, e para um período de elevadas emissões, às 10h, para as direções de NNW e SE, e para intensidades de ventos de 2 m.s⁻¹ e 5 m.s⁻¹. Para todas as simulações foi usada uma resolução da malha de 5m x 5m x 5m.

À semelhança das figuras anteriores, os hexágonos localizados nas figuras correspondem, a vermelho, à antiga EMQA de Teixugueira-Estarreja e, a roxo, à estação atual da Escola Secundária de Estarreja.

Todos os padrões de dispersão encontram-se apresentados com uma escala de concentração normalizada de 0 a 500, sendo que este valor é adimensional. A normalização permite que os valores de concentração apresentados se tornem independentes da velocidade inicial e da taxa de emissão possibilitando assim uma comparação mais fácil e evidente. A equação de normalização dos valores encontra-se representada pela equação 8.

$$C_n = \frac{C \cdot U_h \cdot h^2}{q} \quad \text{[Equação 8]}$$

Em que, C_n é a concentração normalizada, C é a concentração em µg/m³, U_h é a velocidade à altura do topo da canópia urbana e q é o caudal de emissão.

O padrão de dispersão de NO₂ para um período de baixas emissões com ventos de NNW encontra-se representado Figura 40 e na Figura 41 em que a variável corresponde à velocidade inicial de entrada. Em ambas as figuras destaca-se principalmente o arrasto ao longo da EN109, sendo mais evidente com ventos de 5 m.s⁻¹, e a consequente acumulação a sul do domínio causada pelo aglomerado de vegetação e pelos edifícios existentes a sul da área de estudo resultando assim num hotspot de elevadas concentrações correspondendo em ambas as situações ao local de concentração máximo.

Nas figuras é possível ainda observar a importância do vento nas concentrações obtidas. Nas simulações com menor velocidade, a dispersão não é tão significativa sendo que assim se traduz em maiores níveis de concentração relativamente à simulação com maior velocidade. Para a velocidade de entrada de 2 m.s⁻¹ verifica-se uma pequena acumulação próxima à EN109-5 com valores de concentração normalizada de 200-250, sendo que a área desta acumulação é superior com ventos de 5 m.s⁻¹ no entanto os seus valores são inferiores, apresentando valores inferiores a 200.

Contudo para ventos de 5 m.s⁻¹, na zona de arrasto da EN109-5 observa-se que há um aumento nos níveis das concentrações, possivelmente originados pelas perturbações causadas no escoamento pelo elevado número de edifícios presentes naquele local.

Para ambas as velocidades observa-se que a região sul do domínio é bastante afetada e existindo nesta região um mercado e um parque de lazer torna-se então um motivo de preocupação uma vez que existe uma maior exposição por parte da população.

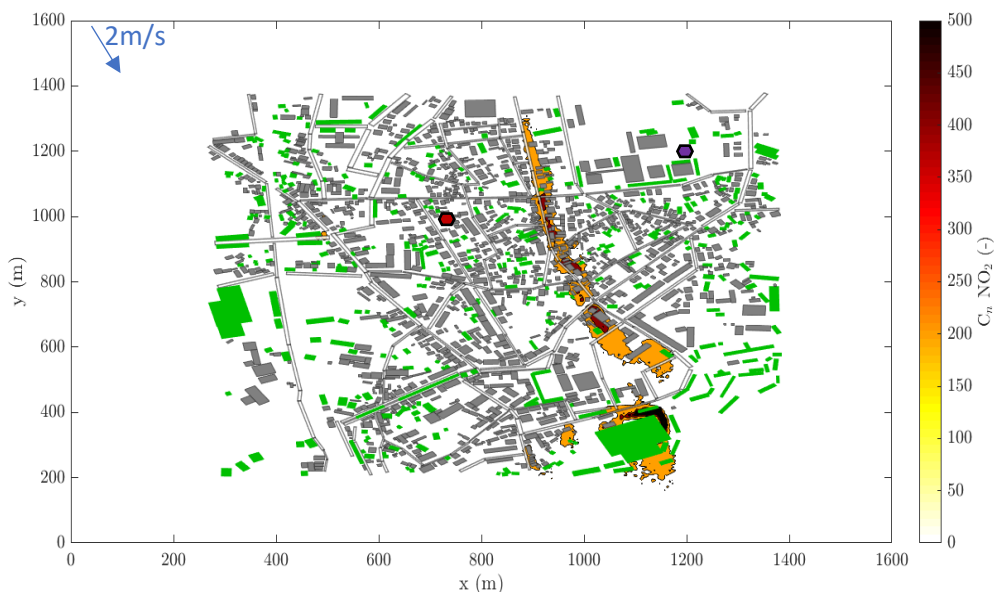


Figura 40- Representação do padrão de dispersão de NO_2 , em concentração normalizada, para um período de baixas emissões (às 5h) para ventos de NNW com intensidade de 2 m.s^{-1} .

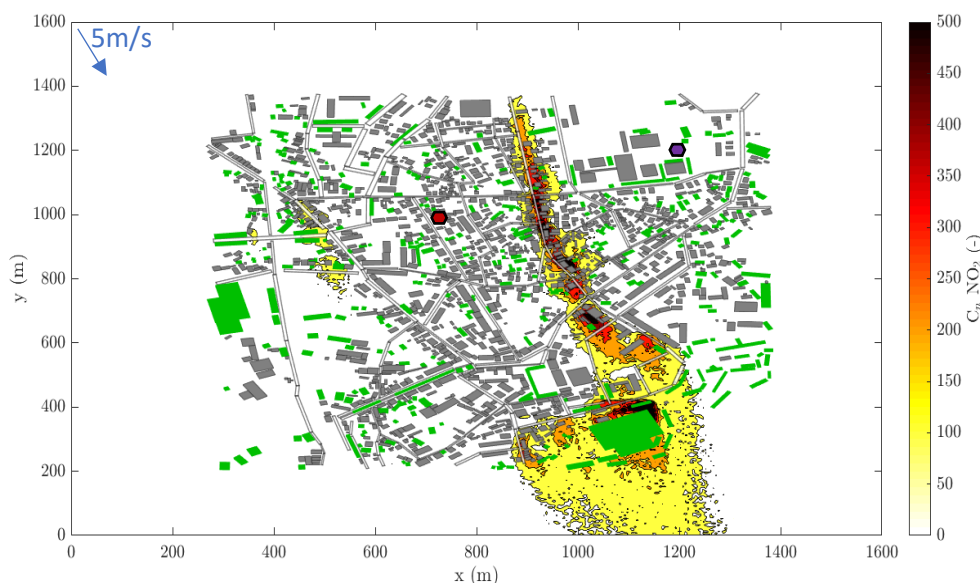


Figura 41- Representação do padrão de dispersão de NO_2 , em concentração normalizada, para um período de baixas emissões (às 5h) para ventos de NNW com intensidade de 5 m.s^{-1} .

Na Figura 42 e Figura 43 recorreu-se às mesmas condições iniciais usadas anteriormente, mas agora para um período de emissões elevadas. Como seria de esperar, para o período de maior tráfego rodoviário, existem maiores níveis de concentração de NO_2 ao longo da EN 109 verificando-se igualmente o aparecimento de diversas zonas no domínio com concentrações significativas.

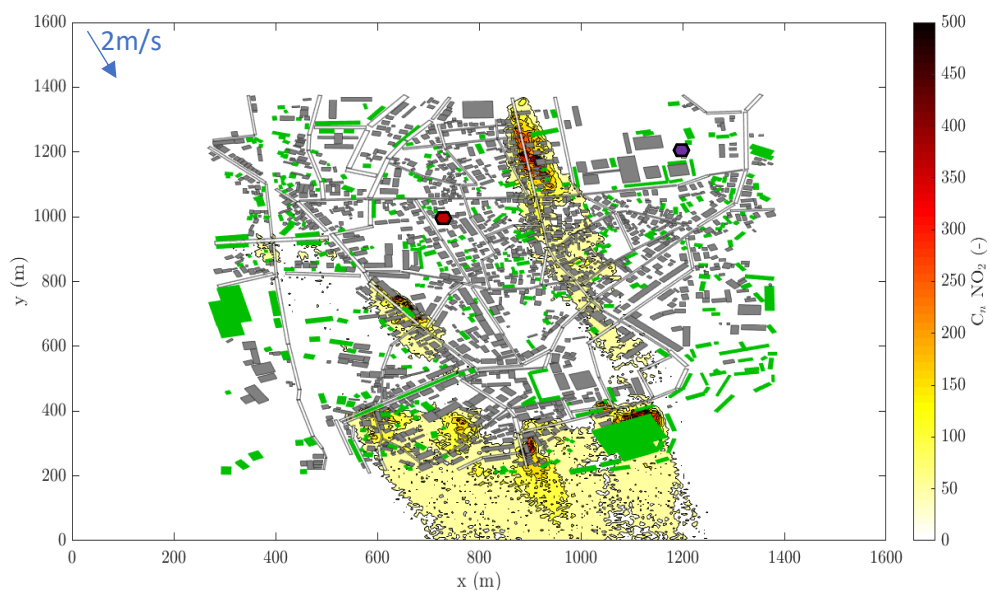


Figura 42- Representação do padrão de dispersão de NO_2 , em concentração normalizada, para um período de elevadas emissões (às 10h) para ventos de NNW com intensidade de 2 m.s^{-1} .

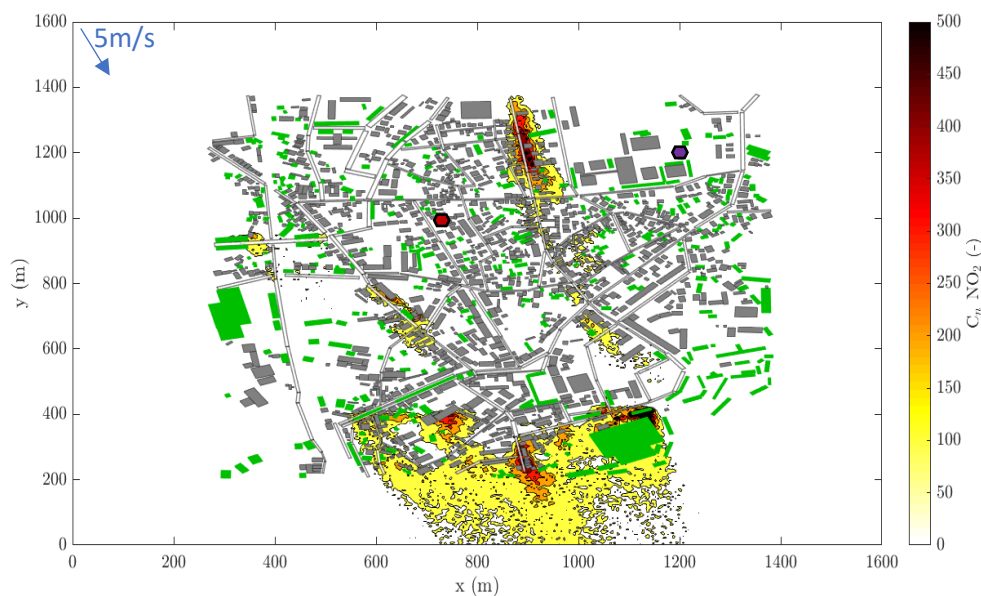


Figura 43- Representação do padrão de dispersão de NO_2 , em concentração normalizada, para um período de elevadas emissões (às 10h) para ventos de NNW com intensidade de 5 m.s^{-1} .

Efetuaram-se simulações para as mesmas condições anteriores, mas agora para ventos de SE. Comparativamente aos ventos com direção NNW, verifica-se uma clara influência do vento na dispersão e consequentemente na qualidade do ar da região. A mudança da direção do vento alterou igualmente a localização da região onde as concentrações são máximas, passando da região sul próximo da vegetação para a região norte na EN109. Houve igualmente o surgimento de

diversas zonas de acumulação na zona centro do domínio onde apresentam valores de concentração normalizada entre 100-150.

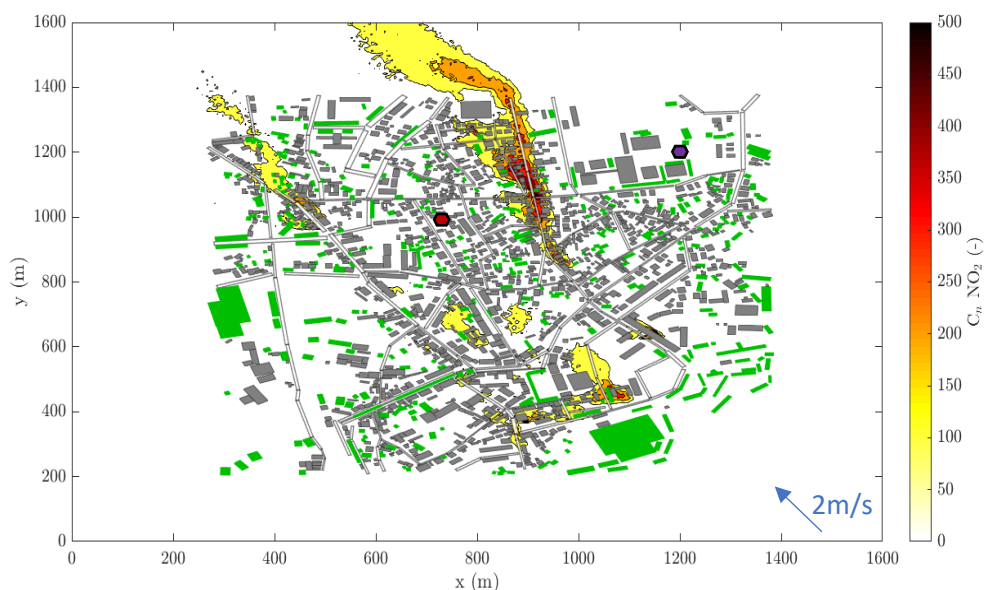


Figura 44- Representação do padrão de dispersão de NO₂, em concentração normalizada, para um período de baixas emissões (às 5h) para ventos de SE com intensidade de 2 m.s⁻¹.

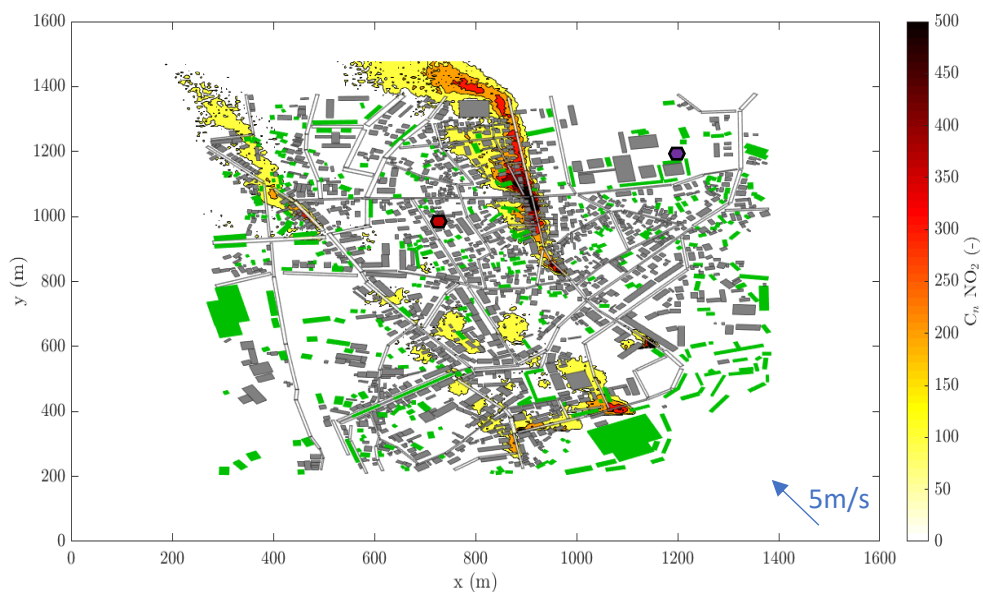


Figura 45- Representação do padrão de dispersão de NO₂, em concentração normalizada, para um período de baixas emissões (às 5h) para ventos de SE com intensidade de 5 m.s⁻¹.

Para esta direção de ventos, na Figura 46 e Figura 47 é possível observar que, principalmente no período de elevada emissão, a qualidade do ar na região é muito afetada. Para estas condições observa-se que a EN109-5 ganha particular destaque, uma vez que tem grande impacto na região NW do domínio. Em ambas as figuras se torna evidente que a região este do

domínio é afetado em grande escala surgindo uma vasta área de acumulação, resultando em diversas zonas com valores de concentração normalizada superiores a 300.

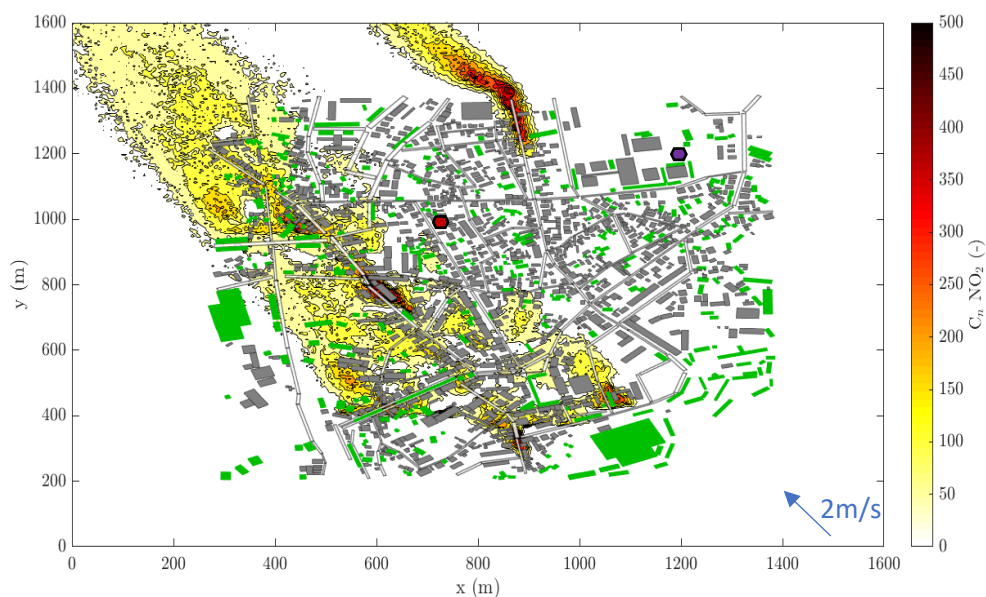


Figura 46- Representação do padrão de dispersão de NO_2 , em concentração normalizada, para um período de elevadas emissões (às 10h) para ventos de SE com intensidade de 2 m.s^{-1} .

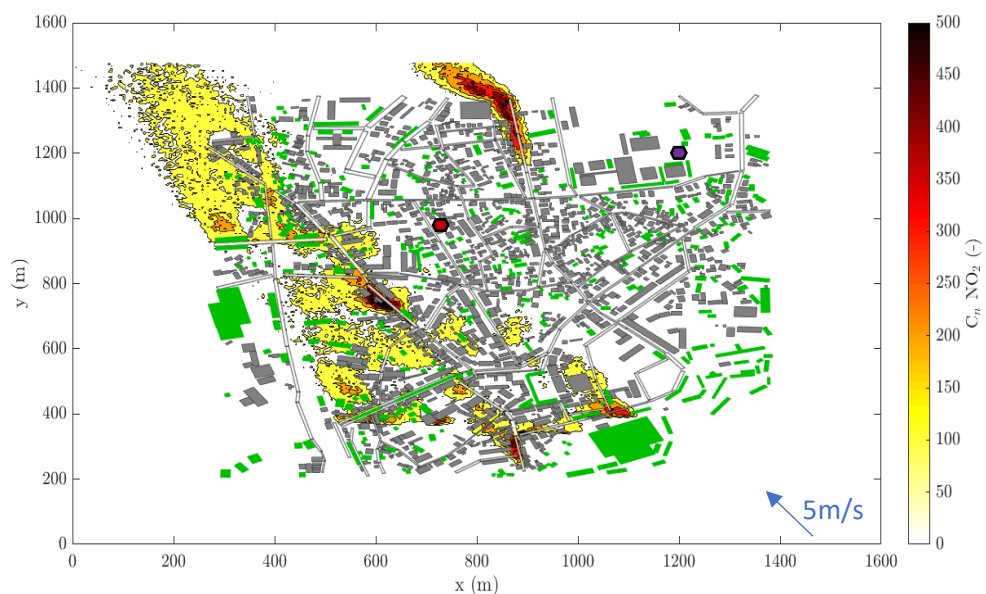


Figura 47- Representação do padrão de dispersão de NO_2 , em concentração normalizada, para um período de elevadas emissões (às 10h) para ventos de SE com intensidade de 5 m.s^{-1} .

Nas figuras seguintes (Figura 48 à Figura 55) encontram-se os resultados da dispersão de PM_{10} para um período de baixas emissões, às 5h, e para um período de elevadas emissões, às 10h, para as mesmas condições de direções e intensidades de ventos aplicadas na análise do poluente NO_2 .

Na Figura 48 e Figura 49 verifica-se, à semelhança do comportamento do NO_2 para as mesmas condições, um arrasto ao longo da EN109 e uma acumulação causada pelos edifícios e pela vegetação a sul da área de estudo resultando numa zona onde a concentração é máxima.

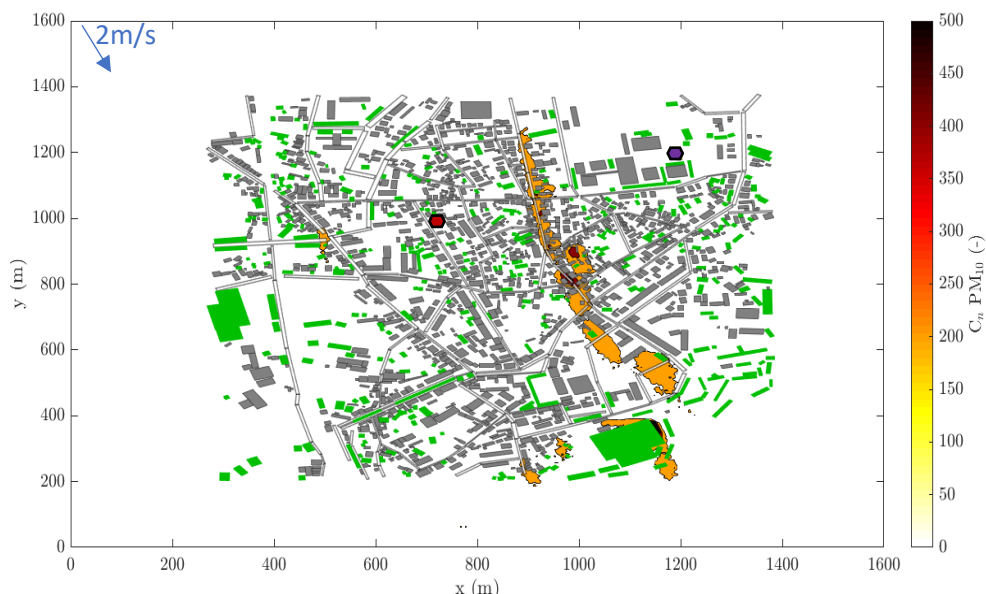


Figura 48- Representação do padrão de dispersão de PM_{10} em concentração normalizada, para um período de baixas emissões (às 5h) para ventos de NNW com intensidade de 2 m.s^{-1} .

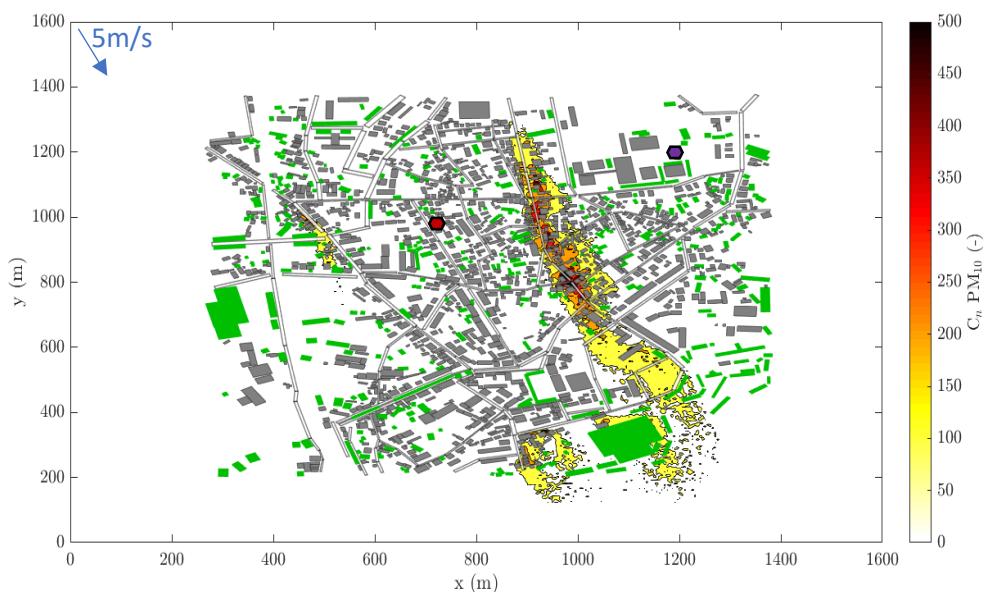


Figura 49- Representação do padrão de dispersão de PM_{10} , em concentração normalizada, para um período de baixas emissões (às 5h) para ventos de NNW com intensidade de 5 m.s^{-1} .

Nas Figura 50 observa-se principalmente a existência de aglomerados com concentrações normalizadas superiores a 200. Na Figura 51 observa-se novamente um elevado arrasto a sul do domínio. Contudo, os valores obtidos nestas simulações não correspondem ao esperado uma vez que em comparação com as mesmas condições para baixas emissões seria esperado uma área com concentrações significativas maior que no caso anterior, o que não se verifica nestas figuras.

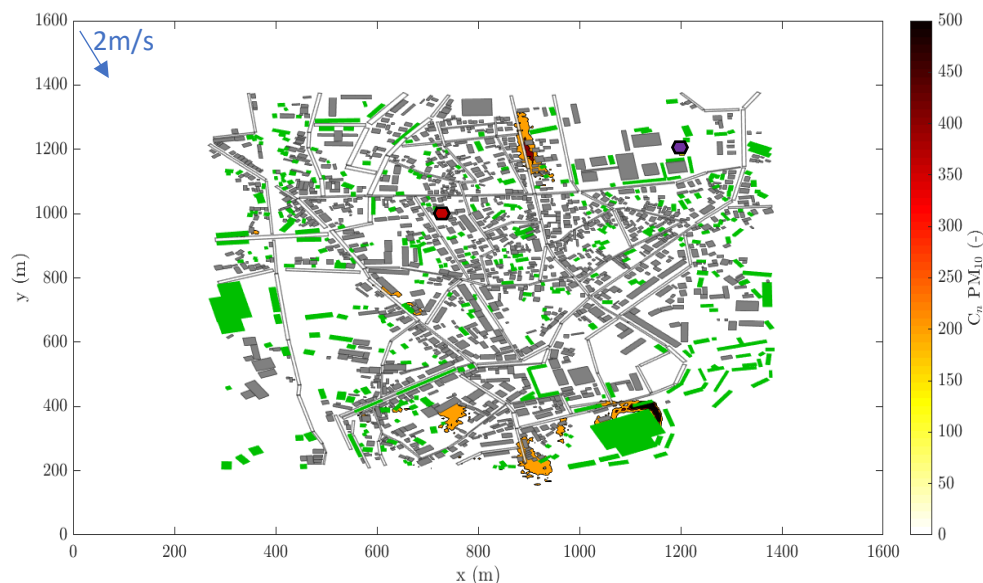


Figura 50-Representação do padrão de dispersão de PM_{10} , em concentração normalizada, para um período de elevadas emissões (às 10h) para ventos de NNW com intensidade de 2 m.s^{-1} .

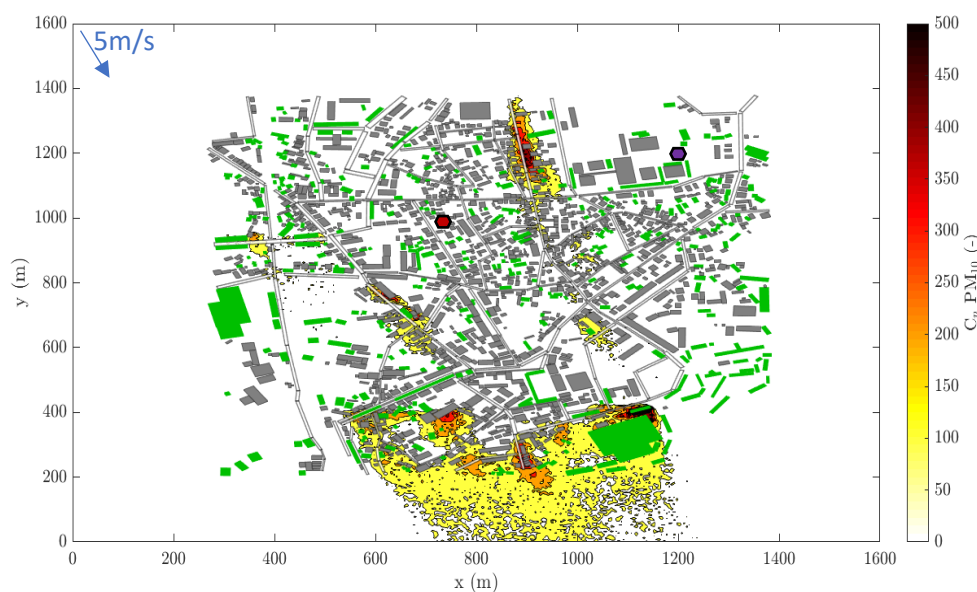


Figura 51- Representação do padrão de dispersão de PM_{10} , em concentração normalizada, para um período de elevadas emissões (às 10h) para ventos de NNW com intensidade de 5 m.s^{-1} .

Para as PM_{10} , com ventos de SE, verifica-se um comportamento semelhante ao registado com o NO_2 . Observa-se uma grande dispersão do poluente pela área de estudo, resultando numa degradação da qualidade do ar em grande parte da cidade. Registrando-se diversas áreas com valores de concentração normalizada superiores a 150.

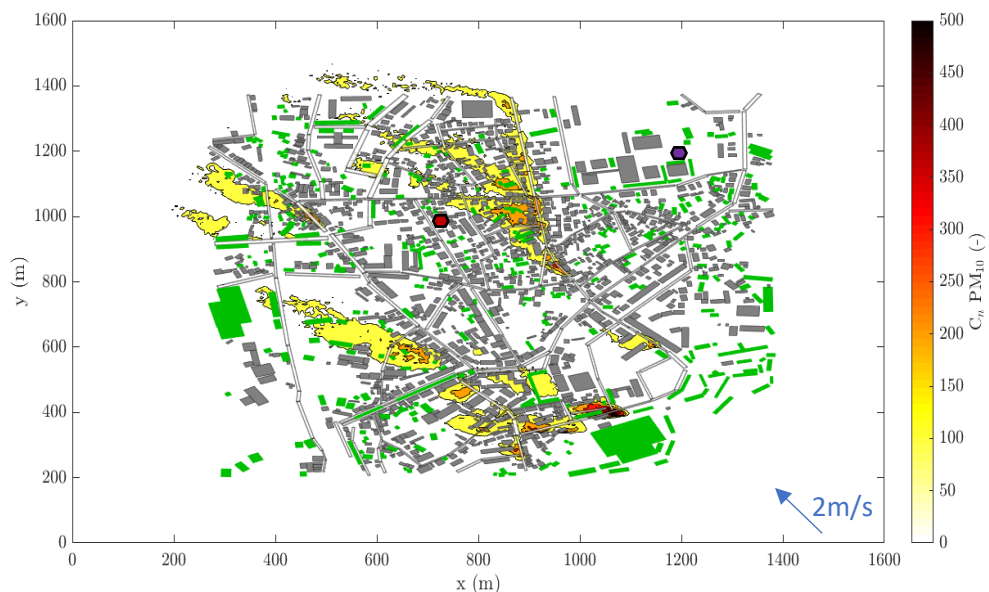


Figura 52- Representação do padrão de dispersão de PM_{10} , em concentração normalizada, para um período de baixas emissões (às 5h) para ventos de SE com intensidade de $2m.s^{-1}$.

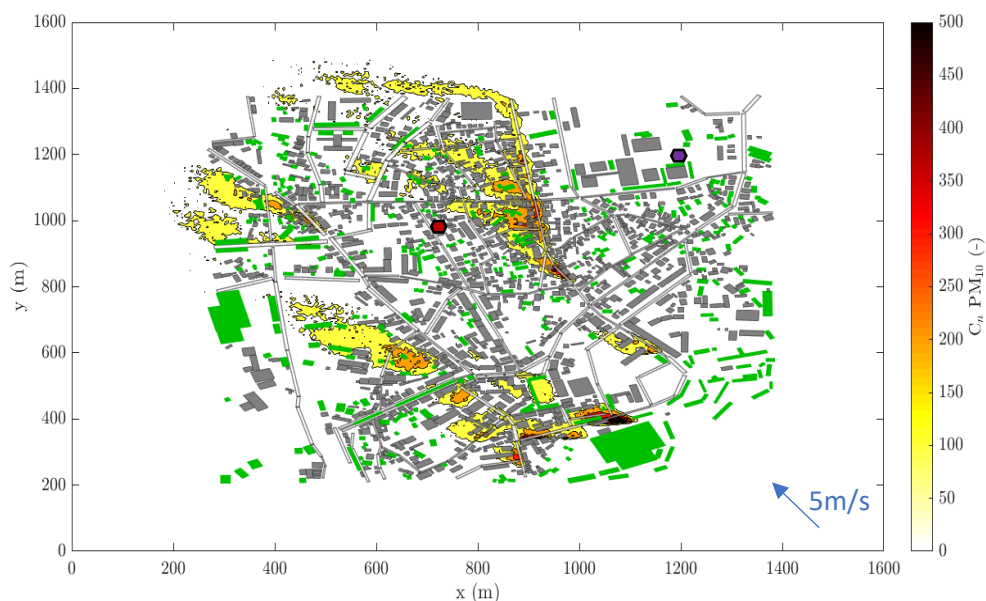


Figura 53- Representação do padrão de dispersão de PM_{10} , em concentração normalizada, para um período de baixas emissões (às 5h) para ventos de SE com intensidade de $5 m.s^{-1}$.

Na Figura 54 e Figura 55 ocorre, como seria de esperar, um maior impacto na qualidade do ar da região causado pelo aumento de tráfego rodoviário. Observa-se que a região este do domínio é fortemente afetada, verificando-se o máximo nas coordenadas $x=620m$ e $y=780m$, mas também se verificam valores muito elevados na EN109 e nas proximidades da EN109-5.

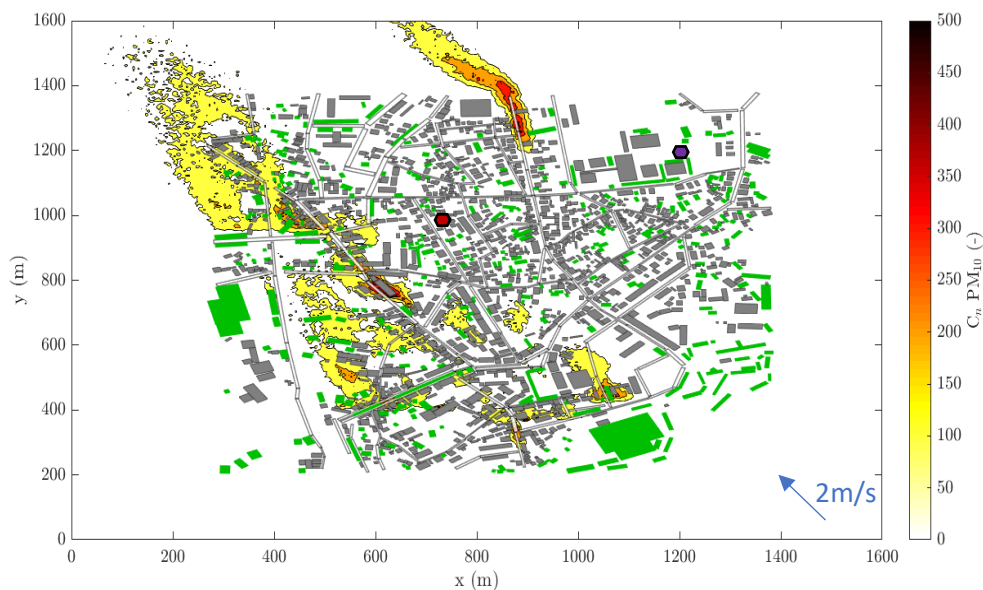


Figura 54- Representação do padrão de dispersão de PM_{10} , em concentração normalizada, para um período de elevadas emissões (às 10h) para ventos de SE com intensidade de 2 m.s^{-1} .

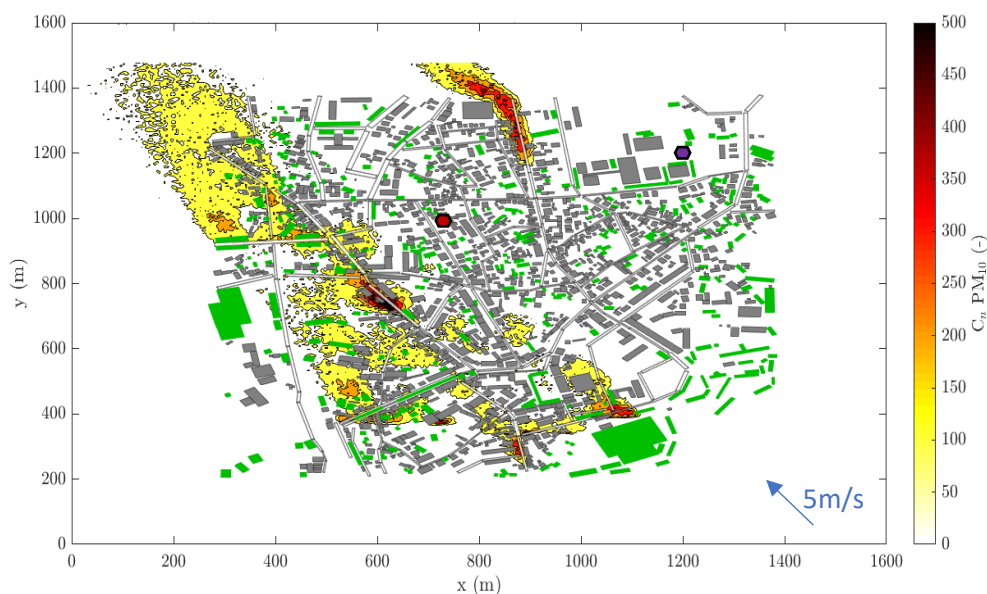


Figura 55- Representação do padrão de dispersão de PM_{10} , em concentração normalizada, para um período de elevadas emissões (às 10h) para ventos de SE com intensidade de 5 m.s^{-1} .

Ao analisar os gráficos dos padrões de dispersão para o domínio D1 verifica-se que a representatividade das emissões corresponde principalmente às principais vias que atravessam o centro da cidade. Apesar de fornecer uma ideia geral sobre o centro da cidade, não permite compreender o que acontece no local antigo e no local atual da EMQA. Para contornar esta problemática optou-se por simular as duas regiões em torno das EMQA para um período de elevadas emissões e vento de SE com intensidade de 2 m.s^{-1} , condições estas que traduzem o pior

cenário simulado sob o ponto de vista de impacto na qualidade do ar da cidade. Contudo, também se efetuaram simulações para as condições mais frequentes durante o ano, sendo estas para uma direção de vento de NNW e velocidade 2 m.s^{-1} .

Para a simulação do local de Estarreja-Teixugueira são abrangidas 11 estradas, 24 árvores e 150 edifícios, numa dimensão em estudo de aproximadamente 244 m por 262 m. Para o local da Escola Secundária foram consideradas 17 estradas, 34 árvores e 140 edifícios, numa dimensão de 373 m por 455 m. A representação dos campos de ventos de ventos para ambos os domínios encontram-se no Anexo E.

Na Figura 56 encontra-se representado o padrão de dispersão de NO_2 para a região de Estarreja-Teixugueira e na Figura 57 encontra-se a representação do padrão de dispersão de NO_2 para a região da Escola Secundária, encontrando-se localizado em ambas o local exato das EMQA. Ambos os padrões de dispersão correspondem a ventos com intensidade de 2 m.s^{-1} e direção SE.

Na região de Estarreja-Teixugueira (Figura 56) o valor de concentração normalizada registado no local da EMQA é de 44 sendo que o valor máximo obtido nesta simulação é de 402 ocorrendo próximo das habitações mais a norte nas coordenadas ($x=718\text{m}$ e $y=883\text{m}$).

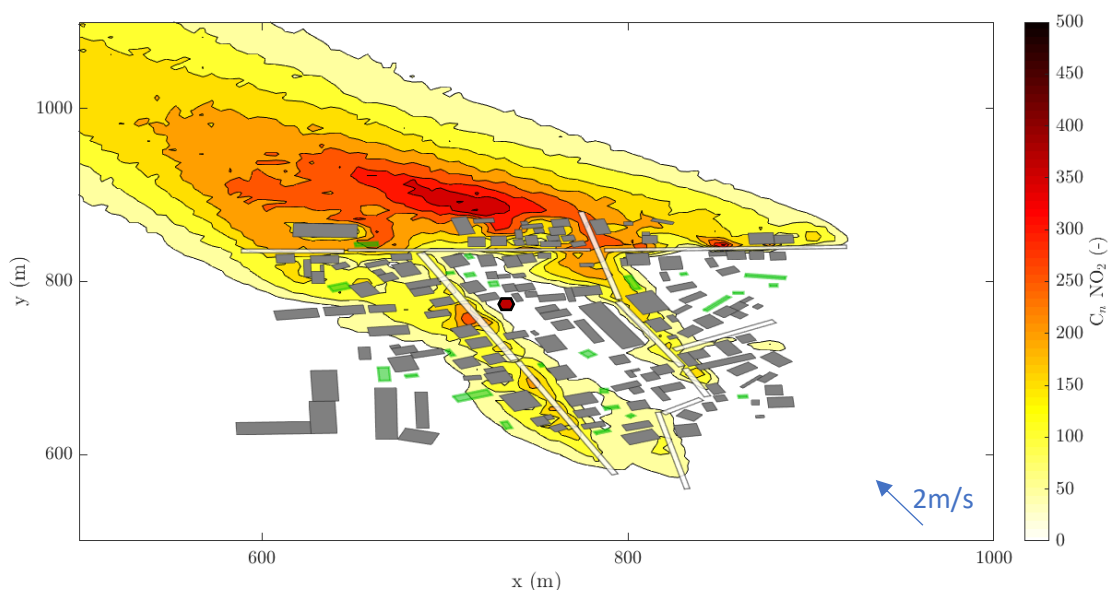


Figura 56- Representação do padrão de dispersão de NO_2 , em concentração normalizada, no domínio da região de Estarreja-Teixugueira para um período de elevadas emissões para ventos de SE com intensidade de 2 m.s^{-1} .

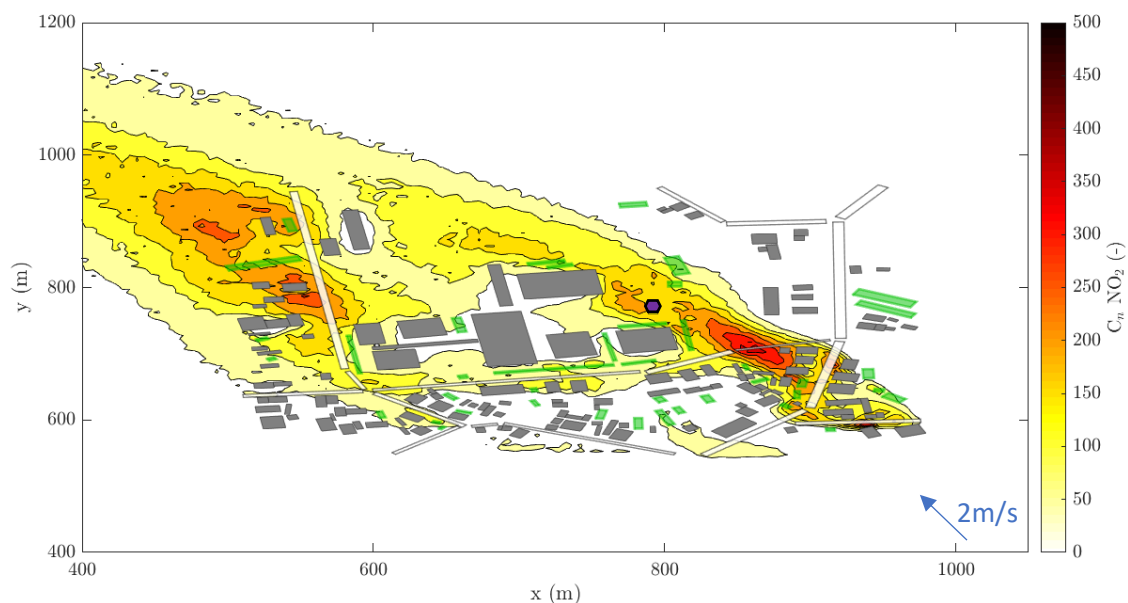


Figura 57- Representação do padrão de dispersão de NO_2 , em concentração normalizada, no domínio da região da Escola Secundária para um período de elevadas emissões para ventos de SE com intensidade de 2 m.s^{-1} .

Para estas condições meteorológicas, apesar de não serem as mais frequentes, verificou-se que no novo local da estação de monitorização, nomeadamente na Escola Secundária, é onde se observa maior influência por parte do tráfego rodoviário. Sendo que neste local a EMQA apresenta valores de concentração normalizada de aproximadamente 186, correspondendo a um valor muito superior ao registado no antigo local de Estarreja-Teixugueira. Contudo, o valor máximo obtido é inferior ao obtido no caso anterior, observando-se um valor máximo de concentração normalizada igual a 366 sendo que este valor é atingido em mais que um local registando-se principalmente a SE do domínio.

Na Figura 58 e Figura 59 encontra-se representado o padrão de dispersão para PM_{10} sob as mesmas condições meteorológicas apresentadas previamente. Os padrões de dispersão para PM_{10} são bastantes semelhantes aos padrões apresentados por NO_2 . O valor de concentração normalizada registado junto da estação de Estarreja-Teixugueira (Figura 58) é de 32 e na Escola Secundária de Estarreja (Figura 59) é de 169.

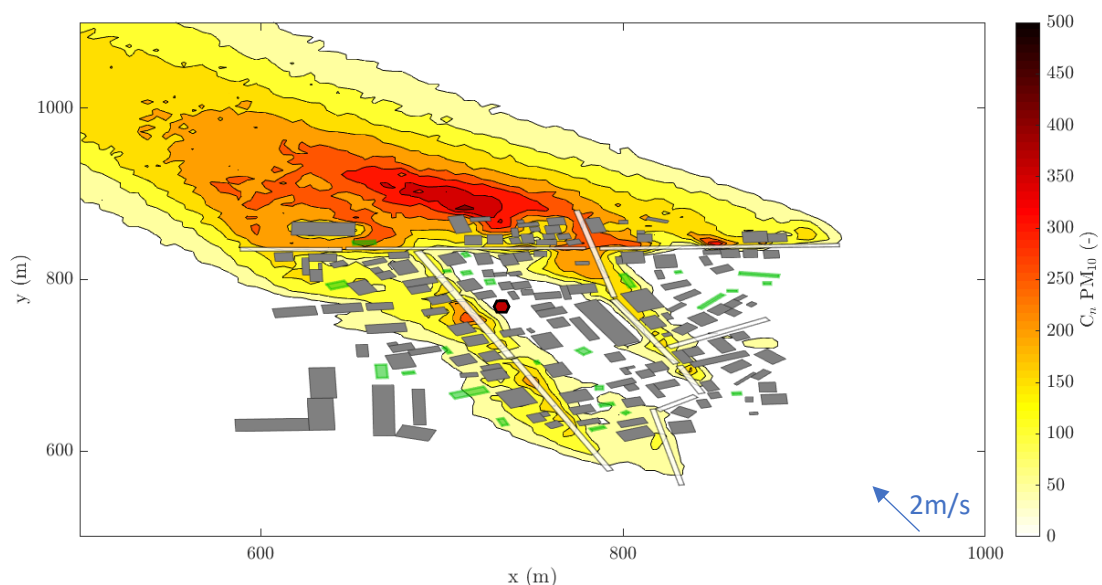


Figura 58- Representação do padrão de dispersão de PM_{10} , em concentração normalizada, no domínio da região de Estarreja-Teixugueira para um período de elevadas emissões para ventos de SE com intensidade de 2 m.s^{-1} .

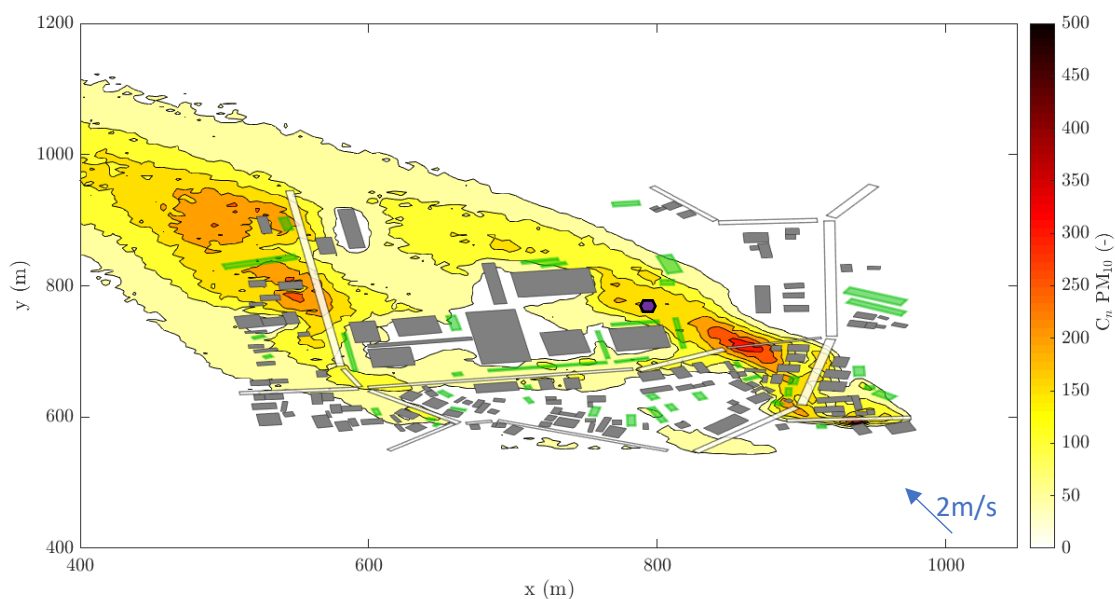


Figura 59- Representação do padrão de dispersão de PM_{10} , em concentração normalizada, no domínio da região da Escola Secundária para um período de elevadas emissões para ventos de SE com intensidade de 2 m.s^{-1} .

Efetuaram-se simulações para os mesmos domínios alterando a incidência do vento de SE para NNW, mantendo-se a velocidade do vento simulada de 2 m.s^{-1} . Deste modo pretende-se avaliar como os locais da EMQA são afetados para as condições meteorológicas mais frequentes. Os campos de ventos, assim como a direção do escoamento para estes cenários podem também ser observados no Anexo E.

Na Figura 60 e Figura 61 observa-se o padrão de dispersão para o poluente NO_2 para as condições meteorológicas previamente referidas. Sendo a direção NNW considerada a direção típica ao longo do ano, torna-se então importante avaliar os padrões de dispersão para estas condições. Contrariamente aos padrões apresentados previamente na simulação para ventos de SE, não se verifica uma influência significativa por parte do tráfego junto da estação de monitorização. Próximo à EMQA de Estarreja-Teixugueira (Figura 60) regista-se um valor de concentração normalizada de 47 e na EMQA da Escola Secundária (Figura 61) um valor de 9. Em que o valor máximo é mais elevado no domínio de Estarreja-Teixugueira, com 487 (a observar-se nas coordenadas, $x=848\text{m}$ e $y=587\text{m}$) relativamente à região da Escola Secundária com 387 (em $x=918\text{m}$ e $y=573\text{m}$).

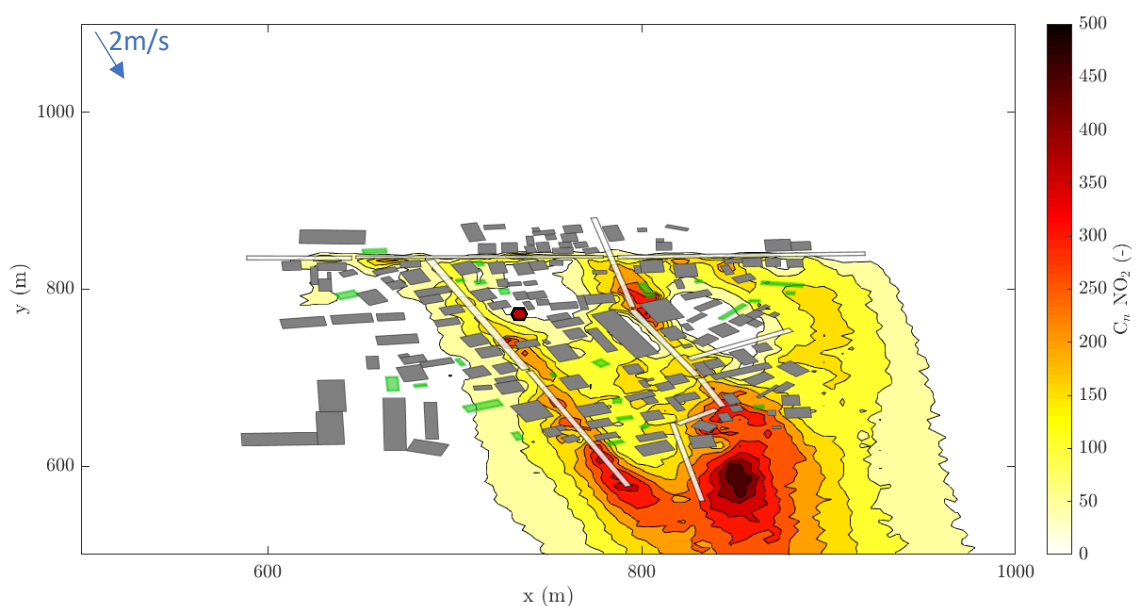


Figura 60- Representação do padrão de dispersão de NO_2 , em concentração normalizada, no domínio da região de Estarreja-Teixugueira para um período de elevadas emissões para ventos de NNW com intensidade de 2 m.s^{-1} .

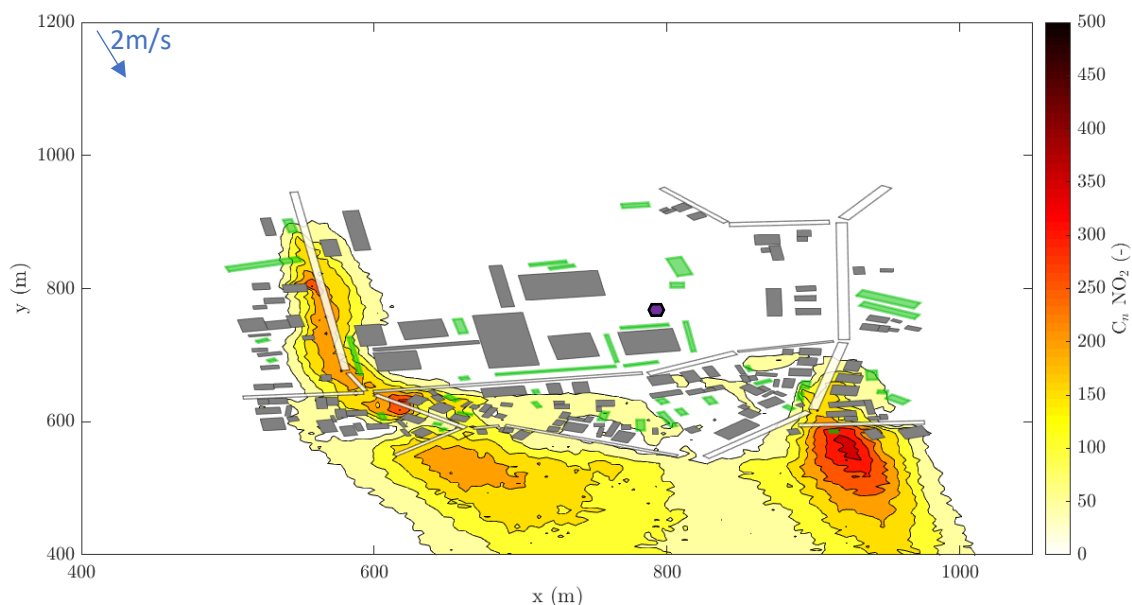


Figura 61- Representação do padrão de dispersão de NO_2 , em concentração normalizada, no domínio da região da Escola Secundária para um período de elevadas emissões para ventos de NNW com intensidade de 2 m.s^{-1} .

Em seguida, na Figura 62 e na Figura 63 encontra-se representado, respetivamente, os padrões de dispersão de PM_{10} para o local de Estarreja-Teixugueira e para a Escola Secundária. Sendo que os padrões de ambos os poluentes são muito aproximados, os valores máximos obtidos são registados na mesma região do domínio para ambos os casos. Sendo que no domínio de Estarreja-Teixugueira atinge o valor máximo de 496 ($x=853\text{m}$ e $y=592\text{m}$) e no domínio da Escola Secundária atinge o valor de 339 ($x=928\text{m}$ e $y=552\text{m}$). Os valores registados juntos da EMQA, apresentam novamente uma larga discrepância de um local para o outro em que no local antigo da estação (Figura 62) o valor medido é de 38 e no local atual (Figura 63) é de 9.

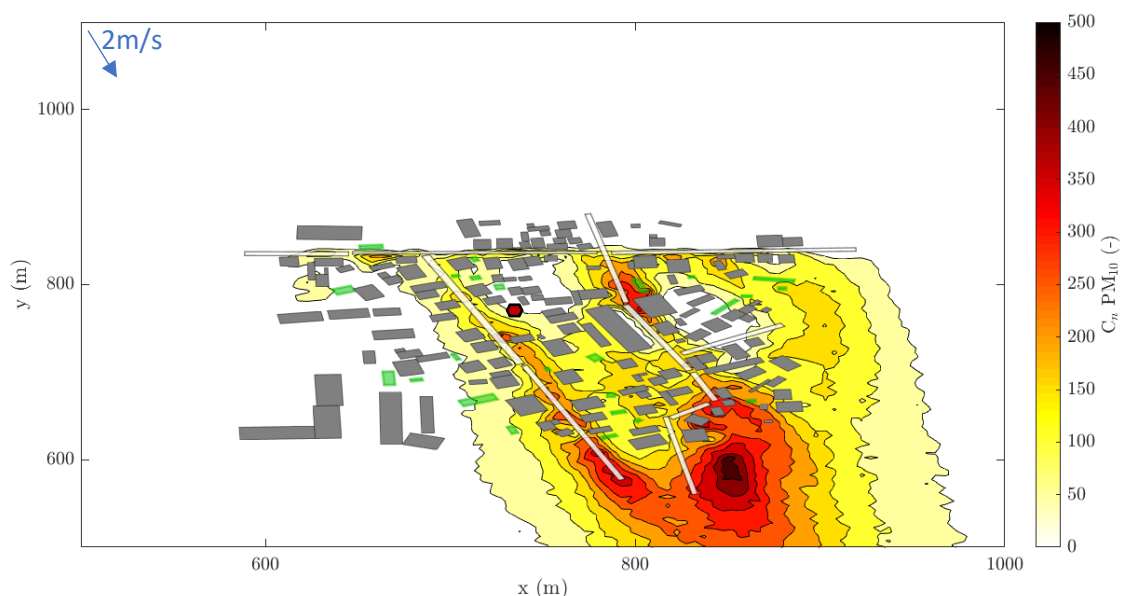


Figura 62- Representação do padrão de dispersão de PM_{10} , em concentração normalizada, no domínio da região de Estarreja-Teixugueira para um período de elevadas emissões para ventos de NNW com intensidade de 2 m.s^{-1} .

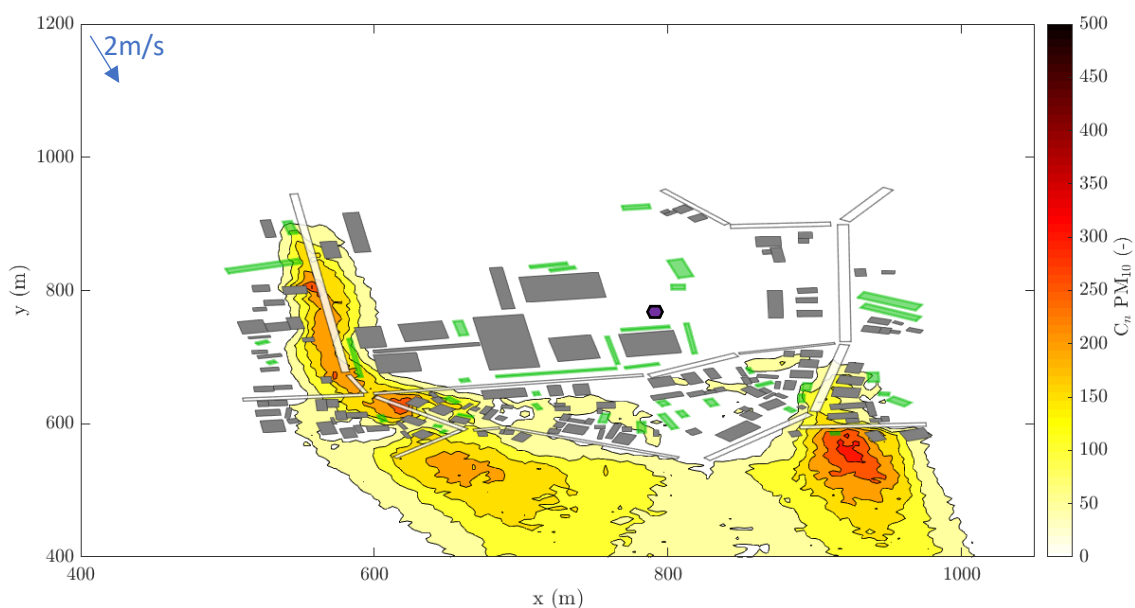


Figura 63- Representação do padrão de dispersão de PM_{10} , em concentração normalizada, no domínio da região da Escola Secundária para um período de elevadas emissões para ventos de NNW com intensidade de 2 m.s^{-1} .

Para os ventos de SE, verificou-se que para ambos os poluentes os valores juntos da EMQA apresentam maior influência do trânsito, sendo notório principalmente na Escola Secundária de Estarreja.

Para ventos de NNW, em ambos os casos, não se observam grande influência das estradas circundantes sobre as estações. O que seria esperado no caso da Escola Secundária visto que não

existem estradas no domínio a norte do complexo. Contudo, o mesmo não seria esperado no local de Estarreja-Teixugueira, uma vez que existe uma estrada com tráfego significativo a norte do mesmo. Com base na simulação observa-se que os edifícios a norte da EMQA bloqueiam em parte a dispersão dos poluentes. Na Escola Secundária, com os ventos de NNW a influência do tráfego rodoviário no local da estação é quase nula.

A partir das condições de ventos simuladas é possível observar que mesmo não contabilizando a EN109 existe uma forte influência do tráfego rodoviário proveniente das estradas secundárias, influenciando assim em grande escala a qualidade do ar.

Como já foi referido previamente, de modo a avaliar a influência do CQE na qualidade do ar do centro de Estarreja foi criado o domínio D2. Este domínio engloba o domínio D1, o qual foi mantido como o mesmo rigor, e as cinco fontes pontuais pertencentes ao CQE.

Na Figura 64 e Figura 65 encontram-se representados os padrões de dispersão para NO_2 e Pm_{10} . As condições meteorológicas simuladas correspondem a ventos de NNW e com intensidade de 5m/s, optaram-se por estas condições visto que o domínio D1, correspondente ao centro da cidade, se localiza a sul do CQE.

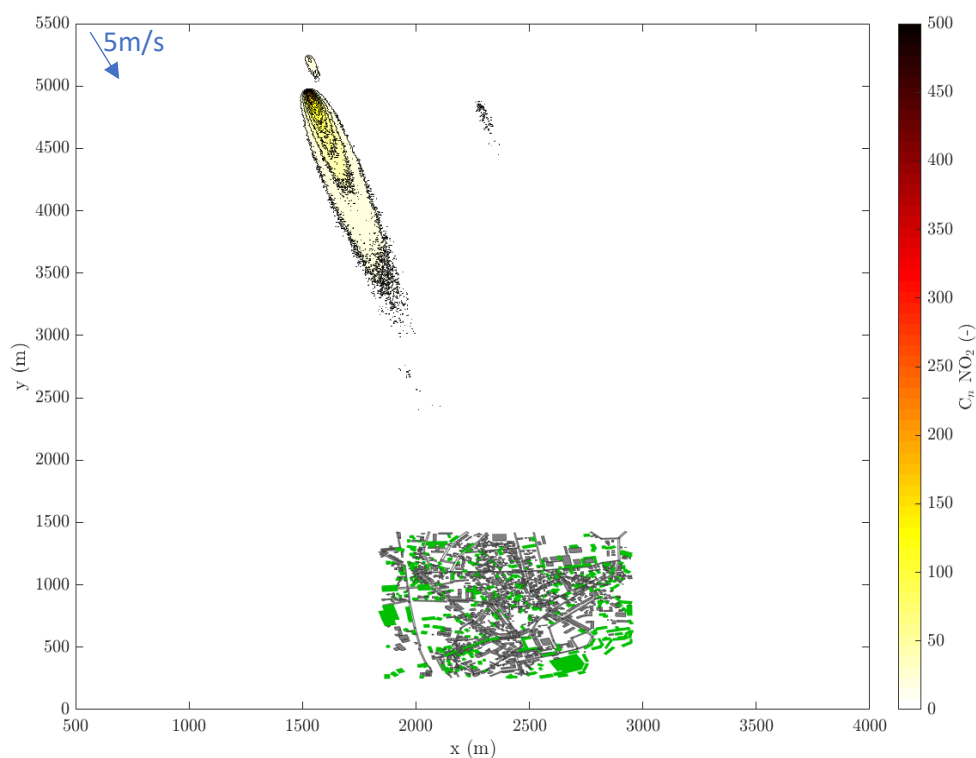


Figura 64- Representação do padrão de dispersão de NO_2 , em concentração normalizada, para o domínio D2 para ventos de NNW com intensidade de 5 m.s^{-1} .

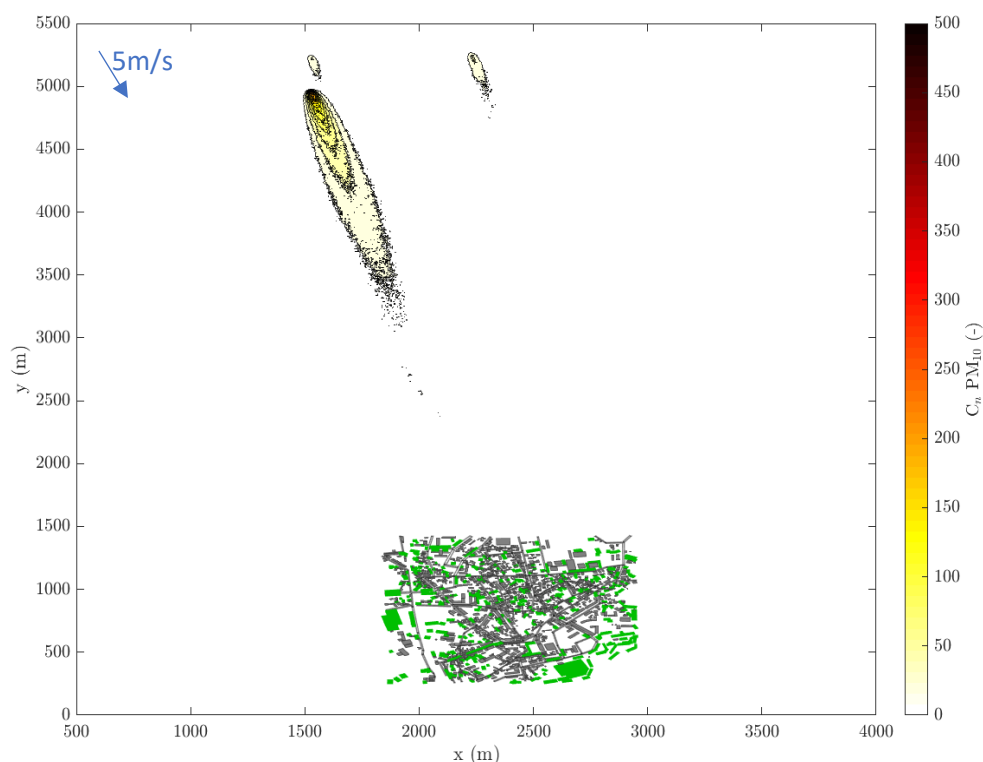


Figura 65- Representação do padrão de dispersão de PM_{10} , em concentração normalizada, para o domínio D2 para ventos de NNW com intensidade de 5 m.s^{-1} .

Com as condições meteorológicas assumidas nestas simulações verifica-se que a direção das plumas emitidas pelas fontes pontuais do complexo se arrasta para o centro da cidade, contudo não é possível observar uma influência direta das emissões do CQE na área de estudo para a altura do corte em análise ($k=2,5\text{ m}$). Para compreender a extensão da pluma em toda a sua magnitude seria importante analisar a extensão vertical da mesma.

A pluma evidenciada no padrão de dispersão de maior dimensão, para ambos os poluentes, corresponde à fábrica DOW.

Na análise dos valores no centro da cidade observa-se que para os dois poluentes apenas se verificam concentrações muito baixas. Sendo que em diversas zonas do domínio os valores são residuais, havendo locais com valores nulos. A partir deste modelo conclui-se que a única influência no centro da cidade é proveniente do trânsito local não se verificando influência do CQE no domínio em análise.

6. Conclusão

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo principal de avaliar e quantificar o impacto da indústria e do tráfego rodoviário na qualidade do ar no município de Estarreja e também para comparar as características da localização da EMQA antiga (Estarreja-Teixugueira) e a localização atual (Escola Secundária de Estarreja).

Os elevados custos associados ao investimento e operação envolvidos na monitorização da qualidade do ar conduzem a uma visão restrita da qualidade do ar e da distribuição espacial da concentração de poluentes. Deste modo, a modelação surge como um importante instrumento para auxiliar na caracterização do restante território nacional, proporcionando uma ferramenta decisiva na avaliação de cenários e tomadas de decisão por parte das entidades responsáveis e decisores políticos.

Numa visita ao parque empresarial/eco parque de Estarreja foi possível observar que existe um número elevado de empresas que, de modo pontual ou difuso, apresentam um potencial impacto na qualidade do ar da região. No entanto, não sendo consideradas como grandes fontes pontuais e, por isso, não são obrigadas a reportar as emissões atmosféricas associadas à sua atividade. Assim, não é possível quantificar as emissões destas empresas e incluir esta informação nas simulações efetuadas. Contudo, é possível afirmar que no município de Estarreja, para o NOx e PM₁₀, estão a ser consideradas as fontes de emissão com o impacto mais significativo na qualidade do ar da região.

Com base nos resultados obtidos nas simulações, para as diferentes condições de ventos, para o centro da cidade de Estarreja, confirmou-se que as condições meteorológicas afetam diretamente a qualidade do ar, resultando numa maior degradação da mesma para ventos mais fracos uma vez que a dispersão existente não é suficiente sendo que os poluentes ficam retidos nas proximidades das fontes de emissão. Assim, resultou que dos cenários considerados neste trabalho, apesar de não serem as condições mais frequentes, os ventos provenientes de SE e para velocidades baixas, nomeadamente, 2 m.s⁻¹ são os que têm maior impacto nas concentrações dos poluentes em estudo e consequentemente na qualidade do ar de Estarreja. Para estas condições, o centro da cidade apresenta uma vasta área de concentrações elevadas expondo ser um sério problema.

Para ventos de NNW, sendo esta a direção mais predominante, verificou-se que o arrasto ao longo da EN109 combinado com as características da vegetação e as zonas de recirculação na proximidade dos edifícios a sul da área de estudo contribuiu para a criação de inúmeros pontos de acumulação de concentrações de poluentes. Tendo-se verificado para velocidades maiores (5 m.s⁻¹) um arrasto significativo para sul.

Conclui-se com base nas simulações efetuadas que a via que mais impacto tem na qualidade do ar do centro de Estarreja corresponde à EN 109, que atravessa o centro da cidade, sendo o fluxo desta via superior à A29.

As simulações realizadas com o modelo VADIS demonstram que as duas localizações da estação de monitorização da qualidade do ar de Estarreja não se encontram em pontos de hotspot nem diretamente influenciados pelas emissões do tráfego rodoviário.

Na análise pormenorizada do antigo local e do novo local da EMQA verificou-se que no local da Escola Secundária, com ventos de SE, a estação sofre uma grande influência das vias circundantes. Contudo para os ventos de NNW, condições mais frequentes, não se verifica qualquer influência do tráfego rodoviário. De modo geral, para o local de Estarreja-Teixugueira para as condições simuladas não se regista grande influência do tráfego estando relacionado com os edifícios circundantes que surgem como uma barreira na dispersão dos poluentes.

Com base nas simulações pormenorizadas dos locais da EMQA é possível concluir que os locais escolhidos para a mesma não refletem o impacto que a EN 109 tem na qualidade do ar da região, sendo que para os locais atribuídos à estação a influência é unicamente proveniente das pequenas vias circundantes.

A partir dos resultados obtidos para o domínio D2, foi possível analisar que para as condições meteorológicas consideradas típicas na região, nomeadamente ventos com direção NNW, verificou-se que as plumas se direcionam para o centro da cidade, mas que não chegam a atingir o domínio em estudo para a altura considerada. Podendo-se concluir que para a altura considerada, para possíveis consequências na saúde humana, o CQE não tem uma influência direta. Contudo seria importante para um trabalho futuro com base na aplicação de um modelo Gaussiano simular o desenvolvimento para diferentes condições atmosféricas, simulando para condições estáveis e também para condições atmosféricas instáveis, comparando com os resultados obtidos com o CFD VADIS para condições de estabilidade atmosférica.

É de conhecimento público que se verifica um afastamento das autoestradas para a EN 109 de modo a evitar custos acrescidos nas deslocações, assim uma significativa parte da frota que atravessa o centro da cidade poderia ser evitada, melhorando em grande escala a qualidade do ar na região. Com isto, uma das medidas mais eficientes a aplicar ao nível do tráfego corresponderia a uma canalização dos veículos, principalmente dos pesados, para as autoestradas.

As estimativas obtidas para os valores das concentrações dependem principalmente da qualidade e detalhe dos valores de input utilizados. Frequentemente, por falta de dados de um local é necessário recorrer a registos efetuados noutros locais, como foi o caso dos dados meteorológicos utilizados neste trabalho. Assim, existem incertezas entre as medições usadas relativamente às condições que de facto se verificam no local.

Uma das limitações principais do modelo CFD VADIS está associado a incertezas dos resultados de NO₂ uma vez que este modelo não considera reações químicas.

Uma outra fonte de erro presente neste trabalho encontra-se relacionado, principalmente, com as subestimativas de emissões de PM₁₀ calculadas pelo modelo TREM. Como já foi mencionado ao longo do trabalho, o modelo não contabiliza as emissões não exaustivas e a ressuspensão provocada pelo tráfego e tendo estas um grande peso nas emissões totais, as emissões totais são substancialmente subestimadas. Assim, uma das melhorias a aplicar no modelo TREM resulta da inclusão das emissões não exaustivas e da ressuspensão. Tornando-se esta melhoria ainda mais relevante com o aumento de veículos elétricos, em que as emissões principais originadas pelo tráfego rodoviário serão principalmente por fontes não exaustivas e pela ressuspensão.

Verificam-se outras fontes de erro estando estas relacionadas com o facto de ser de extrema complexidade assumir e quantificar todas as fontes de emissão de PM_{10} e NO_x na região, nomeadamente, a combustão residencial, a agricultura, fontes naturais, entre outros.

Como trabalho futuro seria importante contabilizar um maior número de fontes de emissão, caracterizar um maior número de vias na cidade a partir da contagem direta, sendo que assim iria possibilitar numa maior aproximação à realidade. Seria também de particular interesse recorrer à utilização de outros modelos de modelação atmosférica para comparar e relacionar com os resultados obtidos nesta dissertação. Para este trabalho houve ainda tentativa de incluir as autoestradas e avaliar o seu impacto no centro da cidade, contudo a grande dimensão desse mesmo domínio demonstrou ser um grande entrave aos resultados obtidos tendo então sido excluídos do presente trabalho. Assim, seria importante incluir as autoestradas no domínio com o objetivo de avaliar o seu impacto na qualidade do ar da região.

Referências Bibliográficas

- Ainsworth, E.A.; Yendrek, C.R.; Sitch, S.; Collins, W.J.; Emberson, L.D. (2012); The effects of tropospheric ozone on net primary productivity and implications for climate change. Annual review of plant biology. ISSN 1545-2123;
- Alves, C.A.; Evtyugina, M.; Vicente, A.M.P.; Vicente, E.D.; Nunes, T.V.; Silva, P.M.A.; Duarte, M.A.C.; Pio, C.A.; Amato, F.; Querol, X. (2018); Chemical profiling of PM₁₀ from urban road dust, Science of The Total Environment, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.338>.
- Amorim, J. H. (2003); Modelação do escoamento e da dispersão de poluentes atmosféricos em áreas urbanas; Dissertação de Mestrado em Poluição Atmosférica; Universidade de Aveiro, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Aveiro, Portugal;
- Andrade, J. (1988): Methods of analysis of the distribution of air in acclimatized enclosed spaces. PhD Thesis, Faculty of Engineering of the University of Porto.
- APA, (2008); Agência Portuguesa do Ambiente, Evolução da qualidade do ar em Portugal entre 2001 e 2005. Portugal;
- APA, (2015); Agência Portuguesa do Ambiente, Estratégia Nacional Para o Ar 2020, Emissões Atmosféricas e Qualidade do Ar Ambiente: Enquadramento e Diagnóstico;
- Ashmore, M.; Toet, S.; Emberson, L. (2006); Ozone—a significant threat to future world food production. New Phytol 170:201–204;
- Ashmore, M.R. (2005); Assessing the future global impacts of ozone on vegetation. Plant Cell Environ 28:949–964;
- Borrego, C.; Amorim, J.H.; Valente, J. (2011); Projecto Avenida: Análise microclimática da Av. Lourenço Peixinho. Universidade de Aveiro, Departamento de Ambiente e Ordenamento. Aveiro, Portugal;
- Borrego, C.; Tchepel, O.; Costa, A.M.; Amorim, J.H.; Miranda, A.I. (2003); Emission and dispersion modelling of Lisbon air quality at local scale. Atmospheric Environment 37 (2003) 5197–5205;
- Borrego, C.; Tchepel, O.; Costa, A.M.; Martins, H.; Amorim, J.H.; Miranda, A.I. (2006); Traffic-related particulate air pollution exposure in urban areas, Atmospheric Environment, Volume 40, Issue 37, 2006, Pages 7205-7214, ISSN 1352-2310;
- Borrego, C.; Valente, J.; Carvalho, A.; Sá, E.; Lopes, M.; Miranda, A.I. (2010); Contribution of residential wood combustion to PM₁₀ levels in Portugal. Atmospheric Environment, Volume 44, Issue 5; Portugal;
- Britter, R. e Schatzmann, M. (2007); Model Evaluation Guidance and Protocol Document. COST Action 732 - Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models. 1 May 2007. ISBN: 3-00-018312-4;
- Bukowiecki, N.; Lienemann, P.; Hill, M.; Furger, M.; Richard, A.; Amato, F.; Prevot, A.S.H.; Baltensperger, U.; Buchmann, B.; Gehrig, R. (2010); PM₁₀ Emission Factors for Non-Exhaust Particles

Generated by Road Traffic in an Urban Street Canyon and Along a Freeway in Switzerland. *Atmos. Environ.* 44:2330–2340. doi:10.1016/j.atmosenv.2010.03.039;

CCDRC, (2010); Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro, Plano de Melhoria da Qualidade do Ar na Região Centro. Portugal;

CCDRC, (2015); Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro; Inventário de Emissões Gasosas na Região Centro em 2015; Junho 2016; Portugal;

CCDRC, (2016). Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro, PIB da Região Centro: Processos de convergência e divergência. Maio de 2016. Portugal;

CCDRC, (2017); Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro, Relatório da Qualidade do Ar na Região Centro 2016. Coimbra, Portugal;

CEC, (2005); Commission of the European Communities, Commission Staff Working Paper annex to: The Communication on Thematic Strategy on Air Pollution and The Directive on “Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe”: Impact Assessment; Brussels, Belgium;

Chazarra, A.; Silva, A.; Herráez, C. F.; Barceló, A. M.; Pires, V.; Cunha, S.; Mendes, M.; Neto, J.; Nunes, L. F.; Sánchez, G.; Tavares, C. D.; Couto, M. A. G. (2011). Atlas Climático Ibérico: Temperatura do Ar e Precipitação (1971-2000).

CIRA, (2014); Comunidade Intermunicipal da Região de Aveiro, Estratégia Integrada de Desenvolvimento Territorial 2014-2020. Quadro Comum de Investimentos da Região de Aveiro Relatório. Março de 2014 (revisão v.3 dezembro 2014). Portugal;

Clara, A.R.P. (2013); Análise da Qualidade do Ar da Região Centro – Validação de Políticas. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Universidade do Aveiro;

COSTA, A.M. (2003); Avaliação da Qualidade do Ar ao Nível Local: contributo para o desenvolvimento urbano sustentável. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Mestre em Poluição Atmosférica, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

DAO (2007). Modelo de Emissões dos Transportes para Fontes em Linha – Metodologia. Relatório técnico - Intelligent Energy for Europe. Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro.

Decreto-Lei n.º 102/2010 - Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território - Diário da República, 1.ª série — N.º 186 — 23 de setembro de 2010;

Denier van der Gon, H.A.C.; Gerlofs-Nijland, M.E.; Gehrig, R.; Gustafsson, M.; Janssen, N.; Harrison, R.M.; Hulskotte, J.; Johansson, C.; Jozwicka, M.; Keuken, M.; Krijgheld, K.; Ntziachristos, L.; Riediker, M.; Cassee, F.R. (2013); The policy relevance of wear emissions from road transport, now and in the future – an international workshop report and consensus statement. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 63, 136–149;

Diretiva 2008/50/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 21 de maio de 2008 relativa à qualidade do ar ambiente e a um ar mais limpo na Europa;

- EEA, (2008); European Environment Agency, Dispersal of air pollutants. Copenhagen, Denmark;
- EEA, (2017); European Environment Agency, Air quality in Europe- 2017 report. Copenhagen, Denmark;
- Ferreira, J. C. (2007). Relação Qualidade do Ar e Exposição Humana a Poluentes Atmosféricos. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Doutor em Ciências Aplicadas ao Ambiente. Universidade do Aveiro, Departamento de Ambiente e Ordenamento. Aveiro, Portugal;
- Franke, J.; Hellsten, A.; Schlünzen, H; Carissimo, B. (2007); Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment: COST Action 732 - Quality assurance and improvement of microscale meteorological models. 1 Maio de 2007; Brussels, Belgium;
- Fuhrer, J. (2009); Ozone risk for crops and pastures in present and future climates. Naturwissenschaften. ISSN 0028-1042;
- Guttikunda, S.K. (2008); Estimating health impacts of urban air pollution. In: UrbanEmissions.Info (Ed.), SIM-air Working Paper Series, 06-2008. New Delhi, India;
- ICNF, (2016); Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas; 6º Relatório Provisório de Incêndios Florestais – 2016, 01 de janeiro a 31 de agosto; Departamento de Gestão de Áreas Públicas e de Proteção Florestal; Portugal
- IDAD, (2002); Instituto do Ambiente e Desenvolvimento, Avaliação preliminar da qualidade do ar em Portugal - SO₂, NO₂, NO_x, PM₁₀ e Pb. Portugal;
- Johansson, C., T. Hussein, and H. Karlsson. 2007a. Betydelsen av bullerreducerande beläggning för partikelemissionerna. ITM report 164. ITM Stockholms Universitet, 106 91 Stockholm, Sweden. ISSN 1103-341X. http://www.slb.nu/slb/rapporter/pdf/itm_rapp_164.pdf (documento em sueco);
- Klingberg, J., Engardt, M., Karlsson, P. E., Langner, J., and Pleijel, H. (2014); Declining ozone exposure of European vegetation under climate change and reduced precursor emissions, Biogeosciences, 11, 5269-5283, <https://doi.org/10.5194/bg-11-5269-2014>;
- Mesquita, A. P. (2005); Modelos gaussianos de primeira e segunda geração: um caso de estudo. Departamento de Ambiente e Ordenamento. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Mestre em Poluição Atmosférica. Universidade de Aveiro;
- Monteiro, M.A.C.S. 2007; Desenvolvimento de um sistema de avaliação e previsão da qualidade do ar para Portugal. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Doutor em Ciências Aplicadas ao Ambiente. Universidade do Aveiro, Departamento de Ambiente e Ordenamento. Aveiro, Portugal;
- Nixon, S.C.; Rees, Y.J.; Gunby, J.A.; Moussiopoulos, N.; Berge, E.; Trond B., De Leeuw, F.; Knut, E., Mylona, S.; Tombrou, M. (1999) Ambient air quality, pollutant dispersion and transport models, Topic report No 19/1996; European Environment Agency;
- PACOPAR, (2016); Revista PACOPAR 2016; Revista Anual [consultado a 16 de março] <http://www.pacopar.org/contents/files/revistapacopar-pt-web.pdf>;

Reis, M.; Oliveira, O.; Alves, L.; Rita, E.; Rodrigues, F.; Fialho, P.; Pio, C.; Freitas, M.; Soares, J. (2002). Comparison of continental Portugal and Azores Islands aerosol during a Sahara dust storm. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research—Section B* 189 (1–4), 272–278;

Rexis, M.; Hausberger, S. (2009). Trend of Vehicle Emission Levels Until 2020—Prognosis Based on Current Vehicle Measurements and Future Emission Legislation. *Atmos. Environ.* 43:4689–4698. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.09.034;

Rodrigues, V.; Rafael, S.; Sorte, S.; Coelho, S.; Relvas, H.; Vicente, B.; Leitão, J.; Lopes, M.; Miranda, A.I.; Borrego, C. (2018); Adaptation to Climate Change at Local Scale: A CFD Study in Porto Urban Area, *Computational Fluid Dynamics - Basic Instruments and Applications in Science*, Dr. Adela Ionescu (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/intechopen.72972.

Silva, I.P. (2010); Balanço de Dióxido de Carbono em Áreas Urbanas: Emissão e Sequestro. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Universidade do Aveiro;

Silveira, C.; Ferreira, J.; Monteiro, A.; Miranda, A.I.; Borrego, C. (2017). Emissions from residential combustion sector: how to build a high spatially resolved inventory. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 10.1007/s11869-017-0526-4;

Sorte, S.; Rodrigues, V.; Ascenso, A.; Freitas, S.; Valente, J.; Monteiro, A. (2018); Numerical and physical assessment of control measures to mitigate fugitive dust emissions from harbour activities; Universidade de Aveiro, Portugal;

UN, (2016). United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2016). *The World's Cities in 2016 – Data Booklet (ST/ESA/SER.A/392)*;

UNECE, (2016). United Nations Publication, Economic Commission for Europe, Guidance Document on Emission Control Techniques for Mobile Source under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Geneva, Switzerland;

UNICEF, (2016). United Nations Children's Fund, *Clear the air for children: The impact of air pollution on children*;

Valente, J.F. (2011). Modelação da qualidade do ar e da saúde humana: da mesoescala à dose. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Doutor em Ciências Aplicadas ao Ambiente. Universidade do Aveiro, Departamento de Ambiente e Ordenamento. Aveiro, Portugal;

Valério, M.M.T.B, 2010. Critérios de Sustentabilidade da Ocupação Urbana: Caso de estudo na cidade de Aveiro. Universidade de Coimbra, Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra. Outubro de 2010. Coimbra, Portugal;

Vallero, D.A. (2008). *Fundamentals of Air Pollution (4ª Edição)*. Elsevier. Londres – Reino Unido;

WHO, (2000); World Health Organization, *Air Quality Guidelines for Europe. Second Edition*. Copenhagen, Denmark;

WHO, (2004); World Health Organization, *Health Aspects of Air Pollution Results from The Who Project "Systematic Review of Health Aspects of Air Pollution in Europe"*. Copenhagen, Denmark;

WHO, (2006); World Health Organization, Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005. Summary of risk assessment. Geneva, Switzerland;

WHO, (2016a); World Health Organization, Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. Geneva, Switzerland;

WHO, (2016b); World Health Organization, Health risk assessment of air pollution: General Principles. Copenhagen, Denmark;

WHO, (2017); World Health Organization, World health statistics 2017: monitoring health for the SDGs, Sustainable Development Goals. Geneva, Switzerland;

[URL1] World Health Organization. [consultado em 30 de novembro de 2017] <http://apps.who.int/gho/data/node.main.BODAMBIENTAIRDTHS?lang=en>

[URL2] Agência Portuguesa do Ambiente. [consultado em 27 de outubro de 2017] <https://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=82&sub2ref=316>

[URL3] National Aeronautics and Space Administration [consultado em 12 de novembro] <https://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=90423>

[URL4] Região sustentável. [consultado em 8 de novembro] <http://www.regiaosustentavel.pt/agencia/>

[URL5] Associação Industrial do Distrito de Aveiro. [consultado em 8 de novembro de 2017] <http://aida.pt/regiao/caracterizacao-dos-concelhos.html>

[URL6] Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo [consultado em 20 de março de 2018] <http://www.ccdr-lvt.pt/pt/o-ar-e-os-poluentes-atmosfericos/8082.htm>

[URL7] Instituto Português do Mar e da Atmosfera - Portal do Clima [consultado a 15 de novembro] <http://portaldoclima.pt/pt/>

[URL8] Agência Portuguesa do Ambiente – Base de dados online sobre a qualidade do ar [consultado em 8 de fevereiro de 2018] <https://qualar.apambiente.pt/qualar/index.php?page=5&subpage=9>

[URL9] Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro. [consultado em 17 de novembro de 2017] http://www.ccdrc.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=264:a-rede-de-monitorizacao-da-regiao-centro&catid=275&Itemid=183

[URL10] Grupo de Emissões Modelação e Alterações Climáticas [consultado em 8 de fevereiro de 2018] <https://www.ua.pt/gemac/PageText.aspx?id=11384>

[URL11]. Torre Meteorológica da Universidade de Aveiro [consultado em 1 de junho de 2018] http://torre.fis.ua.pt/data_stations.asp

Anexos

Anexo A

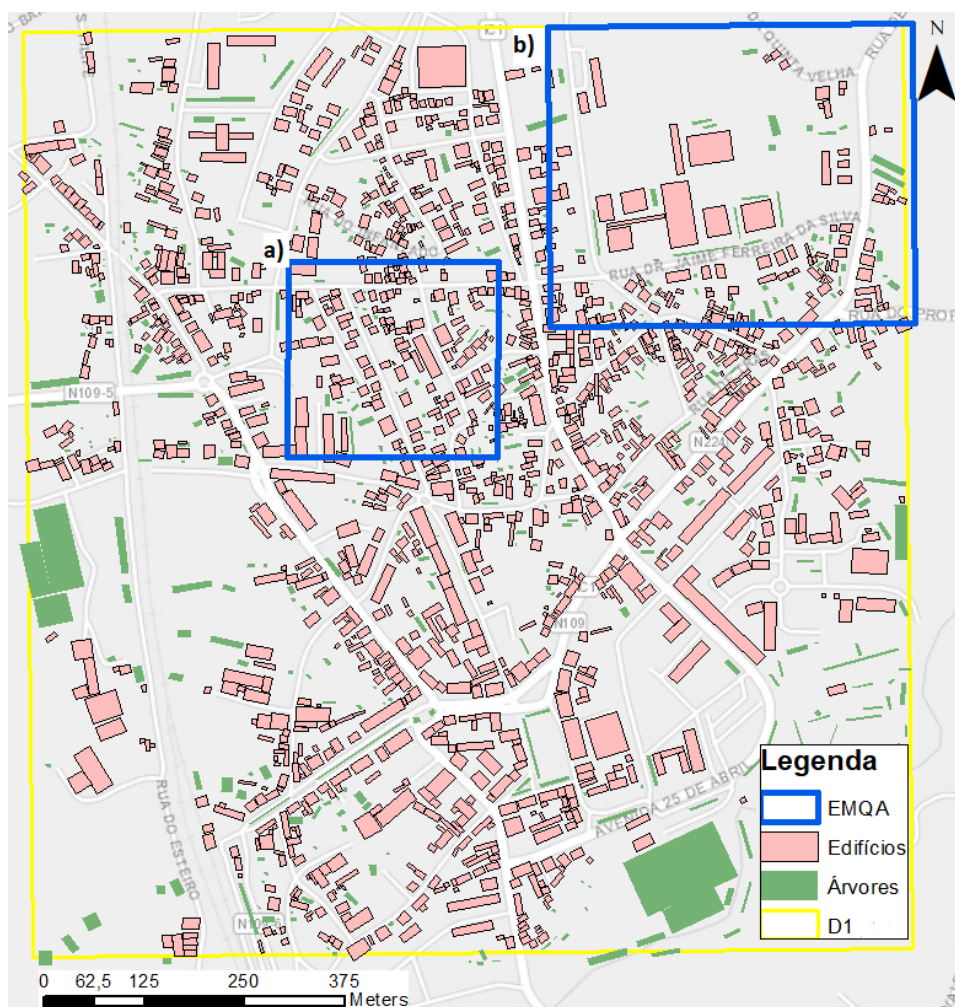


Figura 66- Localização das regiões estudadas das EMQA no domínio D1: a) Estarreja-Teixugueira e em b) Escola Secundária.

Anexo B

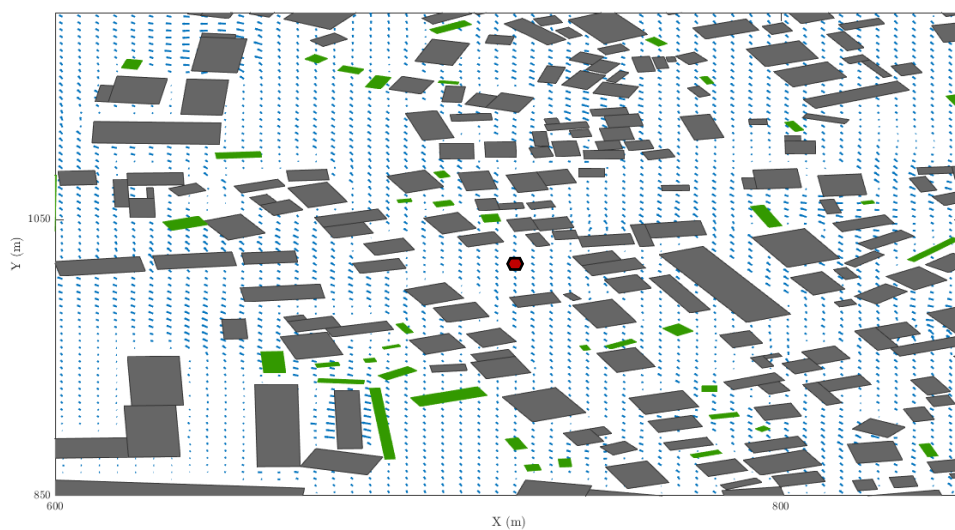


Figura 67- Representação da direção do escoamento para vento de NNW e intensidade de 5m.s^{-1} para a área da Teixugueira.

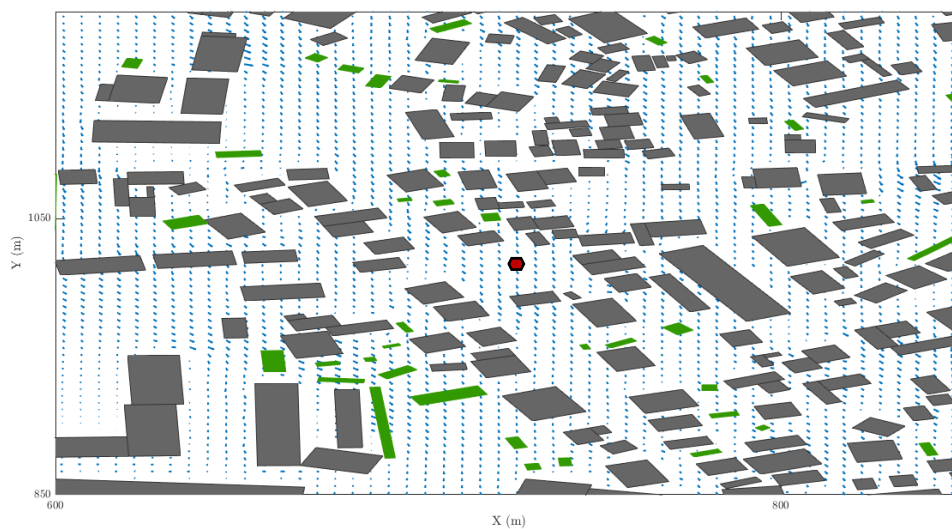


Figura 68- Representação da direção do escoamento para vento de SE e intensidade de 2m.s^{-1} para a área da Teixugueira.

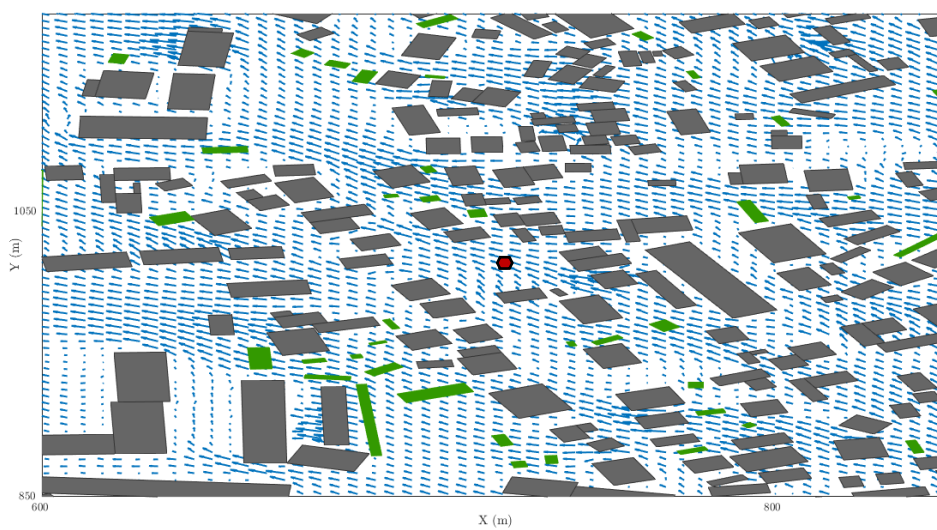


Figura 69- Representação da direção do escoamento para vento de SE e intensidade de 5m.s^{-1} para a área da Teixugueira.

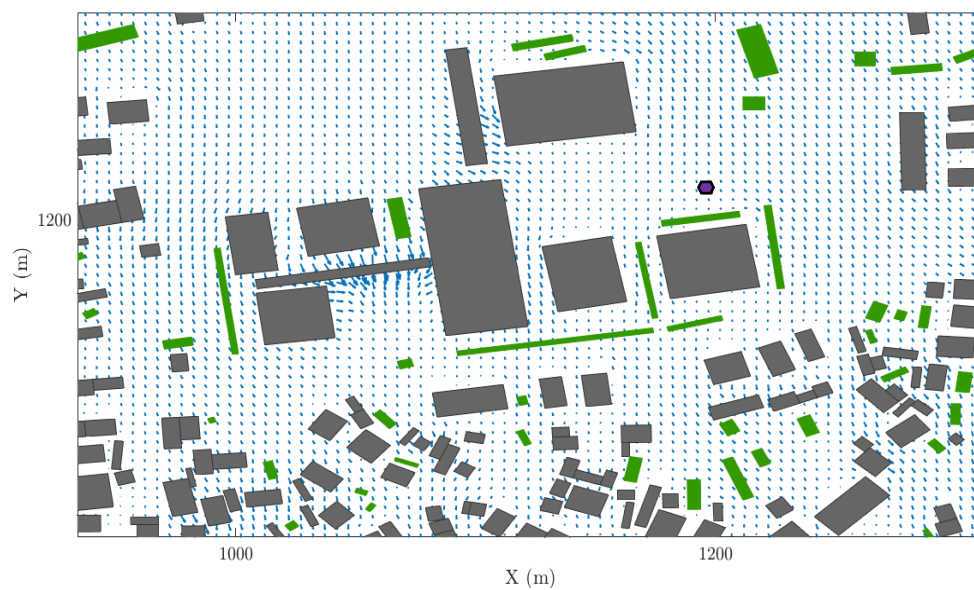


Figura 70- Representação da direção do escoamento para vento de NNW e intensidade de 2m.s^{-1} para a área da Escola Secundária.

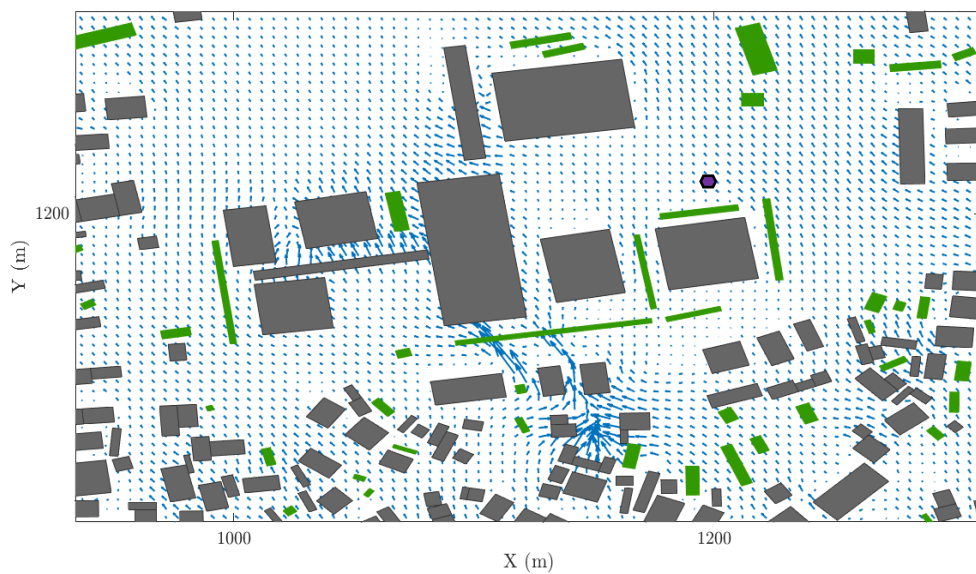


Figura 71- Representação da direção do escoamento para vento de SE e intensidade de 2m.s^{-1} para a área da Escola Secundária.

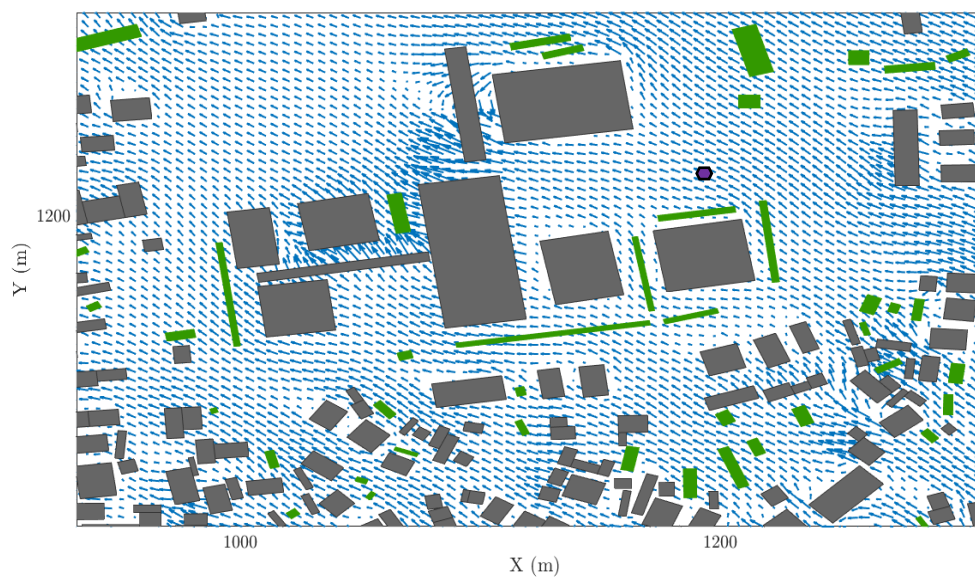


Figura 72- Representação da direção do escoamento para vento de SE e intensidade de 5m.s^{-1} para a área da Escola Secundária.

Anexo C

Vehicle categorie	Classification based on age and capacity		TREM code	% per categorie
Gasoline passenger cars	PRE ECE	CC <1,4 l	K1	0.1
		1,4 l <CC < 2,0 l	K2	0.1
		CC > 2,0 l	K3	0
	ECE 15-00/01	CC <1,4 l	K4	0.2
		1,4 l <CC < 2,0 l	K5	0.2
		CC > 2,0 l	K6	0
	ECE 15-02	CC <1,4 l	K7	0.3
		1,4 l <CC < 2,0 l	K8	0.4
		CC > 2,0 l	K9	0.1
	ECE 15-03	CC <1,4 l	K10	0.5
		1,4 l <CC < 2,0 l	K11	0.6
		CC > 2,0 l	K12	0.1
	ECE 15-04	CC <1,4 l	K13	0.5
		1,4 l <CC < 2,0 l	K14	0.7
		CC > 2,0 l	K15	0.1
	Improved. Conv.	CC <1,4 l	K16	0
		1,4 l <CC < 2,0 l	K17	0
	Open. Loop	CC <1,4 l	K18	0
		1,4 l <CC < 2,0 l	K19	0
	EURO1	CC <1,4 l	K20	6
	(91/441/EEC)	1,4 l <CC < 2,0 l	K21	8.3
		CC > 2,0 l	K22	1
	EURO2	CC <1,4 l	K23	10.8
	(94/12/EC)	1,4 l <CC < 2,0 l	K24	15
		CC > 2,0 l	K25	1.9
	EURO3	CC <1,4 l	K26	10.5
	(98/69/EEC)	1,4 l <CC < 2,0 l	K27	14.5
	Stage 2000	CC > 2,0 l	K28	1.8
	EURO 4	CC <1,4 l	K29	8.1
	(98/69/EC)	1,4 l <CC < 2,0 l	K30	11.2
	Stage 2005	CC > 2,0 l	K31	1.4
	EURO 5	CC <1,4 l	K32	2.2
	(EC 715/2007)	1,4 l <CC < 2,0 l	K33	3
		CC > 2,0 l	K34	0.4
	EURO 6	CC <1,4 l	K35	0
	(EC 715/2007)	1,4 l <CC < 2,0 l	K36	0
Diesel passenger cars	Conventional	CC > 2,0 l	K37	0
		CC < 2,0 l	K38	0
		CC > 2,0 l	K39	0
	EURO1	CC < 2,0 l	K40	14.2
	(91/441/EEC)	CC > 2,0 l	K41	1
	EURO2	CC < 2,0 l	K42	27.1
	(94/12/EC)	CC > 2,0 l	K43	1.9
	EURO3	CC < 2,0 l	K44	26.3
	(98/69/EEC)	CC > 2,0 l		
	Stage 2000		K45	1.9
	EURO 4	CC < 2,0 l	K46	20.3
	(98/69/EC)	CC > 2,0 l		
	Stage 2005		K47	1.5
	EURO 5	CC < 2,0 l	K48	5.4
	(EC 715/2007)	CC > 2,0 l	K49	0.4
LPG passenger cars	Conventional	CC <1,4 l	K52	1.5
		1,4 l <CC < 2,0 l		
		CC > 2,0 l	K54	0.3
	EURO1	CC <1,4 l	K55	6
	(91/441/EEC)	1,4 l <CC < 2,0 l	K56	8.3
	EURO2	CC > 2,0 l	K57	1
		CC <1,4 l	K58	10.8
		1,4 l <CC < 2,0 l	K59	15
	EURO3	CC > 2,0 l	K60	1.9
		CC <1,4 l	K61	10.5
		1,4 l <CC < 2,0 l	K62	14.5
	Stage 2000	CC > 2,0 l	K63	1.8
	EURO 4	CC <1,4 l	K64	10.4
	(98/69/EC)	1,4 l <CC < 2,0 l	K65	14.2
		CC > 2,0 l	K66	1.7

2-Stroke Gasoline Passenger cars	Conventional	(93/59/EEC)	K67	100
Gasoline Light Duty Vehicles	Conventional	(93/59/EEC)	K68	4
(CC < 3.5 t)	EURO1	(96/69/EC)	K69	13.1
	EURO2	(98/69/EC)	K70	29.4
	EURO3	(98/69/EC)	K71	36
	EURO4	(EC 715/2007)	K72	13.6
	EURO5	(EC 715/2007)	K73	3.9
	EURO6		K74	0
Diesel Light Duty Vehicles	Conventional	(93/59/EEC)	K75	1.7
(CC < 3.5 t)	EURO1	(96/69/EC)	K76	13.4
	EURO2	(98/69/EC)	K77	30.1
	EURO3	(98/69/EC)	K78	36.8
	EURO4	(EC 715/2007)	K79	14.0
	EURO5	(EC 715/2007)	K80	4.0
	EURO6		K81	0
Gasoline Heavy Duty Vehicles	Conventional (Weight > 3.5 t)	(93/59/EEC)	K82	100
Diesel Heavy Duty Vehicles	Conventional	Rigid <=7.5 t	K83	0.5
		Rigid 7.5 -12 t	K84	1.3
		Rigid 12 - 14 t	K85	0.3
		Rigid 14 - 20 t	K86	1.6
		Rigid 20 - 26 t	K87	0.5
		Rigid 26 - 28 t	K88	3.1
		Rigid 28 - 32 t	K89	3.1
		Rigid > 32 t	K90	3.1
		Articulated 14 - 20 t	K91	1.4
		Articulated 20 - 28 t	K92	1.4
		Articulated 28 - 34 t	K93	1.5
		Articulated 34 - 40 t	K94	1.5
		Articulated 40 - 50 t	K95	1.5
		Articulated 50 - 60 t	K96	1.5
	EURO1 (91/542/EEC)	Rigid <=7.5 t	K97	0.3
	Step I	Rigid 7.5 -12 t	K98	0.7
		Rigid 12 - 14 t	K99	0.2
		Rigid 14 - 20 t	K100	0.9
		Rigid 20 - 26 t	K101	0.2
		Rigid 26 - 28 t	K102	1.6
		Rigid 28 - 32 t	K103	1.7
		Rigid > 32 t	K104	1.7
		Articulated 14 - 20 t	K105	0.8
		Articulated 20 - 28 t	K106	0.8
		Articulated 28 - 34 t	K107	0.8
		Articulated 34 - 40 t	K108	0.8
		Articulated 40 - 50 t	K109	0.8
		Articulated 50 - 60 t	K110	0.8
		EURO2 (91/542/EEC)	K111	0.4
	Step II	Rigid <=7.5 t	K112	1.2
		Rigid 12 - 14 t	K113	0.3
		Rigid 14 - 20 t	K114	1.4
		Rigid 20 - 26 t	K115	0.4
		Rigid 26 - 28 t	K116	2.7
		Rigid 28 - 32 t	K117	2.7
		Rigid > 32 t	K118	2.7
		Articulated 14 - 20 t	K119	1.2
		Articulated 20 - 28 t	K120	1.2
		Articulated 28 - 34 t	K121	1.3
		Articulated 34 - 40 t	K122	1.3
		Articulated 40 - 50 t	K123	1.3
		Articulated 50 - 60 t	K124	1.3
		EURO3 (1999/96/EC)	K125	0.4
	Step I	Rigid <=7.5 t	K126	1.2
		Rigid 12 - 14 t	K127	0.3
		Rigid 14 - 20 t	K128	1.5
		Rigid 20 - 26 t	K129	0.4
		Rigid 26 - 28 t	K130	2.8
		Rigid 28 - 32 t	K131	2.8
		Rigid > 32 t	K132	2.8
		Articulated 14 - 20 t	K133	1.3
		Articulated 20 - 28 t	K134	1.3
		Articulated 28 - 34 t	K135	1.3
		Articulated 34 - 40 t	K136	1.4
		Articulated 40 - 50 t	K137	1.4
		Articulated 50 - 60 t	K138	1.4
		EURO4	K139	0.2
		Rigid <=7.5 t	K139	0.2

	(1999/96/EC)	Rigid 7.5 -12 t	K140	0.8
	Step II	Rigid 12 - 14 t	K141	0.2
		Rigid 14 – 20 t	K142	0.8
		Rigid 20 – 26 t	K143	0.2
		Rigid 26 – 28 t	K144	1.5
		Rigid 28 – 32 t	K145	1.5
		Rigid > 32 t	K146	1.6
		Articulated 14 – 20 t	K147	0.7
		Articulated 20 – 28 t	K148	0.7
		Articulated 28 – 34 t	K149	0.7
		Articulated 34 – 40 t	K150	0.7
		Articulated 40 - 50 t	K151	0.7
		Articulated 50 - 60 t	K152	0.7
	EURO5	Rigid <=7.5 t	K153	0.3
	(1999/96/EC)	Rigid 7.5 -12 t	K154	0.9
	Step III	Rigid 12 - 14 t	K155	0.2
		Rigid 14 – 20 t	K156	1.1
		Rigid 20 – 26 t	K157	0.3
		Rigid 26 – 28 t	K158	2
		Rigid 28 – 32 t	K159	2.1
		Rigid > 32 t	K160	2.1
		Articulated 14 – 20 t	K161	1
		Articulated 20 – 28 t	K162	1
		Articulated 28 – 34 t	K163	1
		Articulated 34 – 40 t	K164	1
		Articulated 40 - 50 t	K165	1
		Articulated 50 - 60 t	K166	0.9
Diesel Urban Buses	Conventional	Urban <= 15t	K167	7.4
		Urban 15 – 18 t	K168	7.4
		Urban > 18 t	K169	7.4
	EURO1	Urban <= 15t	K170	4
	91/542/EC Step I	Urban 15 – 18 t	K171	4
		Urban > 18 t	K172	4
	EURO2	Urban <= 15t	K173	7.1
	91/542/EC Step II	Urban 15 – 18 t	K174	7.1
		Urban > 18 t	K175	7.2
	EURO3	Urban <= 15t	K176	7.1
	1999/69/EC Step I	Urban 15 – 18 t	K177	7.4
		Urban > 18 t	K178	7.4
	EURO4	Urban <= 15t	K179	3
	1999/69/EC Step II	Urban 15 – 18 t	K180	3
		Urban > 18 t	K181	3
	EURO5	Urban <= 15t	K182	4.5
	1999/69/EC Step III	Urban 15 – 18 t	K183	4.5
	Urban > 18 t	K184	4.5	
Coaches	Conventional	Standard <= 18 t	K185	11.1
		Articulated > 18 t	K186	11.1
	EURO1	Standard <= 18 t	K187	6
	91/542/EC Step I	Articulated > 18 t	K188	6
	EURO2	Standard <= 18 t	K189	10.7
	91/542/EC Step II	Articulated > 18 t	K190	10.7
	EURO3	Standard <= 18 t	K191	11.1
	1999/69/EC Step I	Articulated > 18 t	K192	11.1
	EURO4	Standard <= 18 t	K193	4.4
	1999/69/EC Step II	Articulated > 18 t	K194	4.4
	EURO5	Standard <= 18 t	K195	6.7
	1999/69/EC Step III	Articulated > 18 t	K196	6.7
CNG buses	EURO1	91/542/EC Step I	K197	0
	EURO2	91/542/EC Step II	K198	29.9
	EURO3	1999/69/EC Step I	K199	0
	EEV	1999/96/EC	K200	70.1
Motorcycles	Mopeds	Conventional	K201	35.7
	< 50 cm³	97/24/EC Stage I –EURO 1	K202	64.3
		97/24/EC Stage 2 –EURO 2	K203	0
		2002/51/EC Stg III –EURO3	K204	0
	Motorcycles	Conventional	K205	35.7
	2-Stroke	97/24/EC Stage I –EURO 1	K206	64.3
	> 50 cm³	97/24/EC Stage 2 –EURO 2	K207	0
		2002/51/EC Stg III –EURO3	K208	0
	Motorcycles	Conventional	K209	35.7
	4-Stroke	97/24/EC Stage I –EURO 1	K210	64.3
	(50 – 250 cm³)	97/24/EC Stage 2 –EURO 2	K211	0
		2002/51/EC Stg III –EURO3	K212	0
	Motorcycles	Conventional	K213	35.7

	4-Stroke (250 – 750 cm ³)	97/24/EC Stage I –EURO 1	K214	64.3
		97/24/EC Stage 2 –EURO 2	K215	0
		2002/51/EC Stg III –EURO3	K216	0
	Motorcycles	Conventional	K217	35.7
	4-Stroke	97/24/EC Stage I –EURO 1	K218	64.3
	(> 750 cm ³)	97/24/EC Stage 2 –EURO 2	K219	0
		2002/51/EC Stg III –EURO3	K220	0
New Technologies	Electric Vehicles	Passenger	K221	78.3
		LDV	K222	21.7
	Hybrid Electric Vehicles	Passenger	K223	99.7
		LDV	K224	0.3
	Fuel Cell Vehicles	Passenger	K225	65
		LDV	K226	35
		Urban Bus	K227	0
	Biodiesel	Passenger	K228 – K241	100
		LDV	K242 – K248	100
		HDV	K249 – K332	100
		Buses	K333 – K350	100

Anexo D

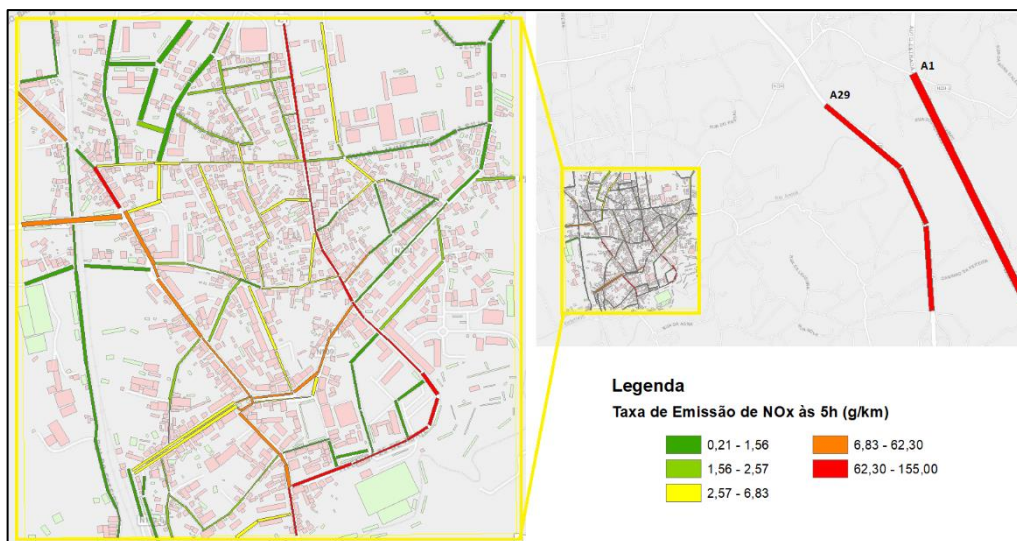


Figura 73- Representação da taxa de emissão por via, em g/km, para NO₂ num período de baixo tráfego rodoviário (5h).

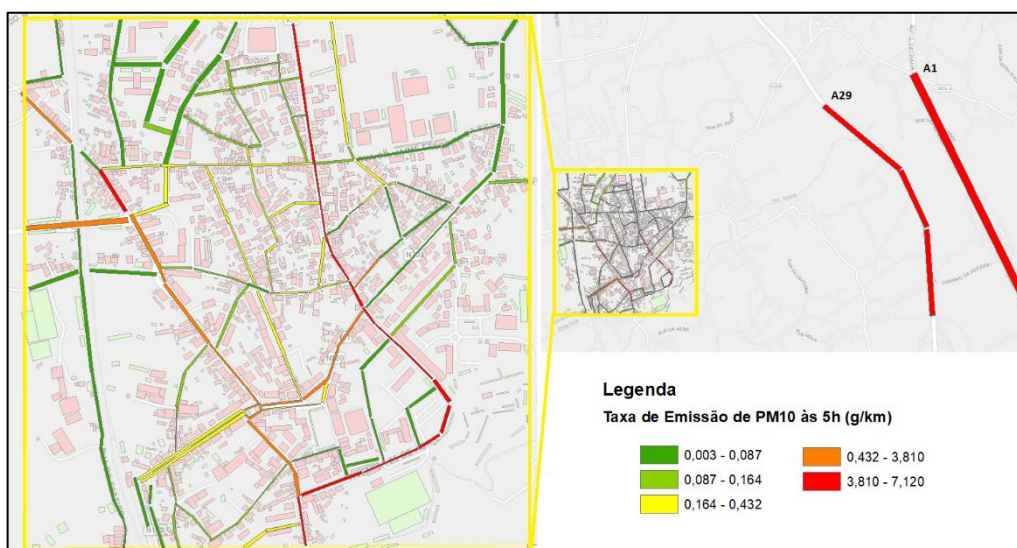


Figura 74- Representação da taxa de emissões por via, em g/km, para PM₁₀ num período de baixo tráfego rodoviário (5h).

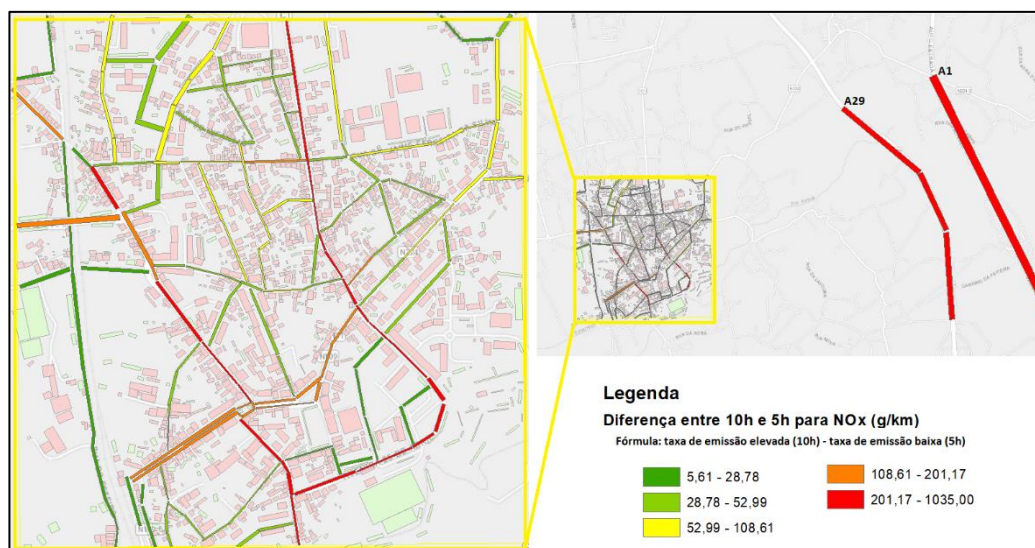


Figura 75- Diferença entre a taxa de emissão para o período de tráfego elevado e baixo por via, em g/km, para NOx.

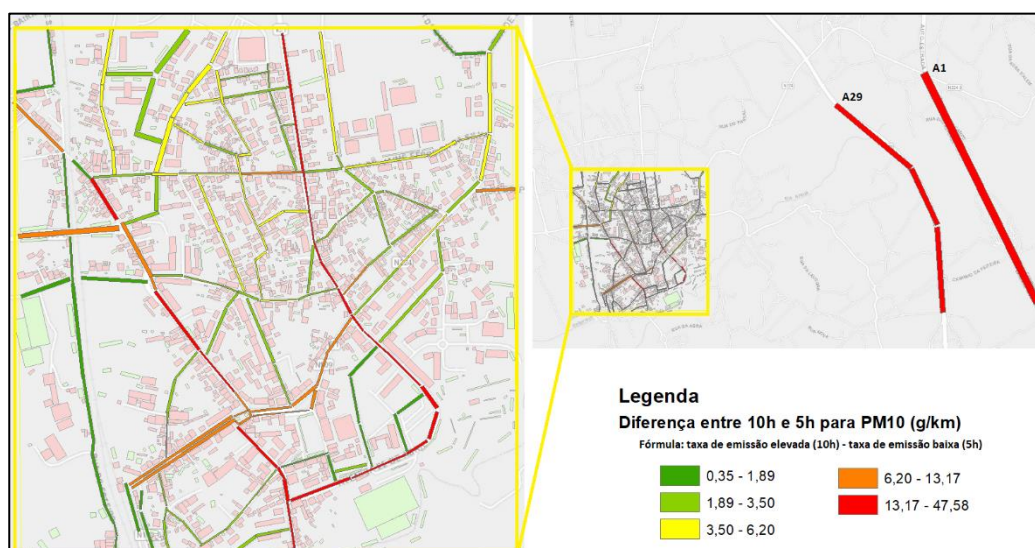


Figura 76- Diferença entre a taxa de emissão para o período de tráfego elevado e baixo por via, em g/km, para PM₁₀.

Anexo E

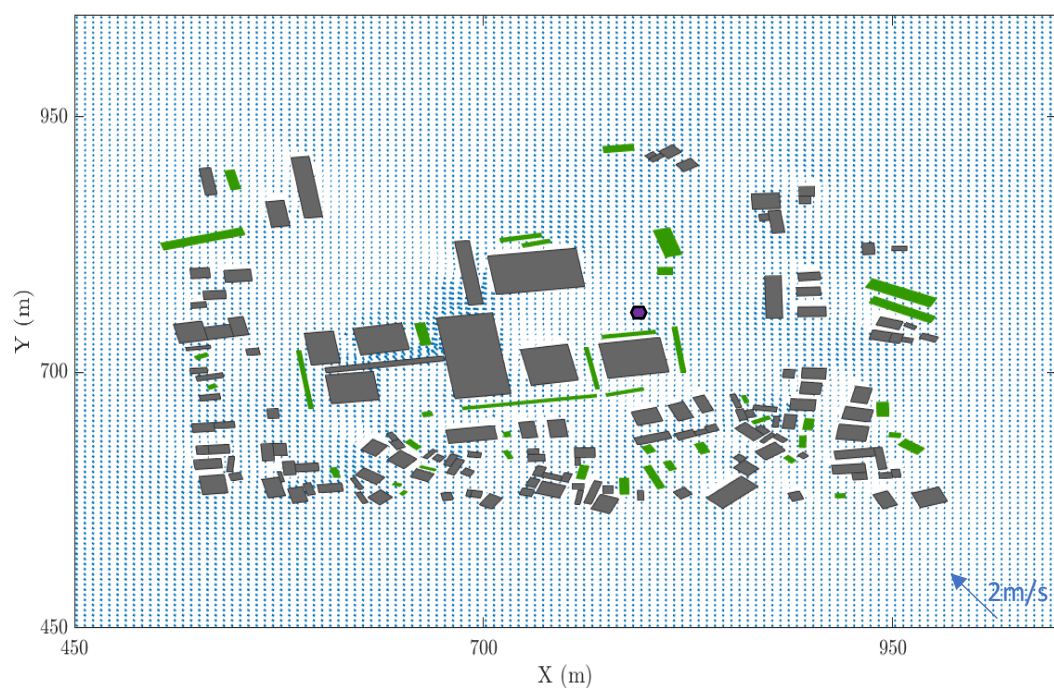


Figura 77- Representação da direção do escoamento no domínio da Escola Secundária de Estarreja para vento de SE e intensidade de 2 m.s^{-1} .

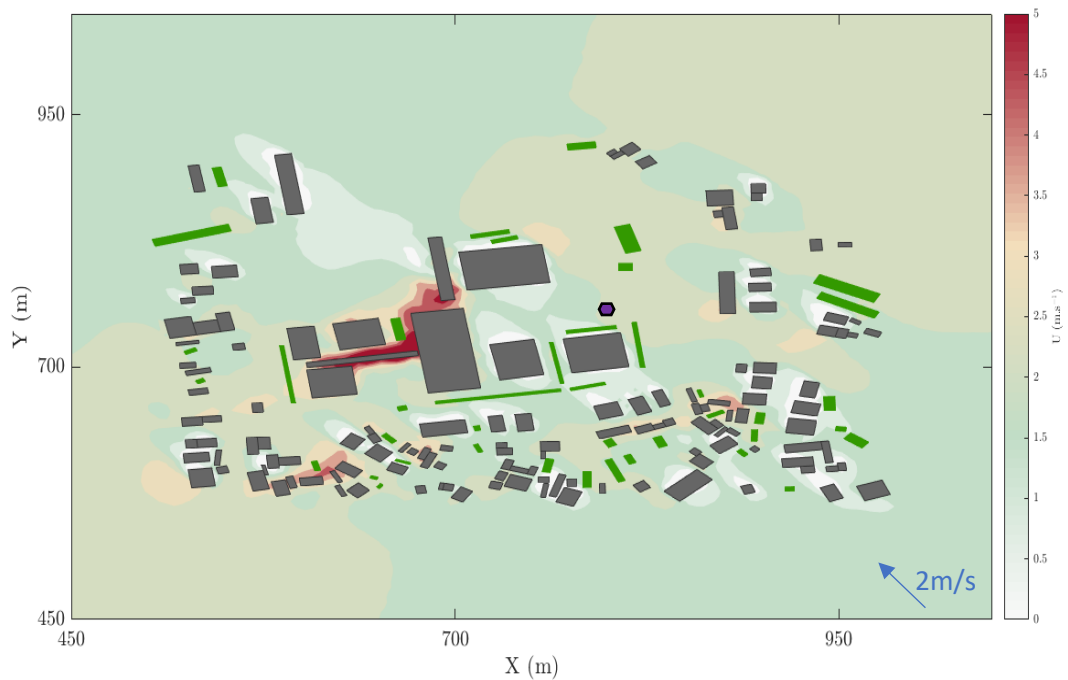


Figura 78- Representação do campo de ventos no domínio da Escola Secundária de Estarreja para vento de SE e intensidade de 2 m.s^{-1} .

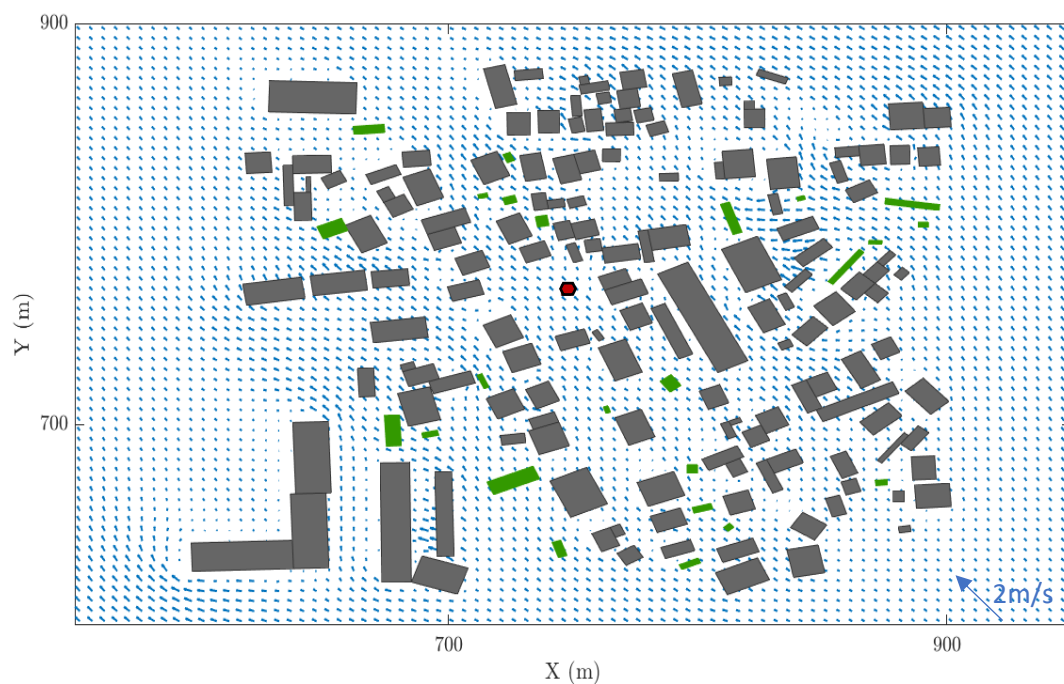


Figura 79- Representação da direção do escoamento no domínio de Teixugueira-Estarreja para vento de SE e intensidade de 2 m.s^{-1} .

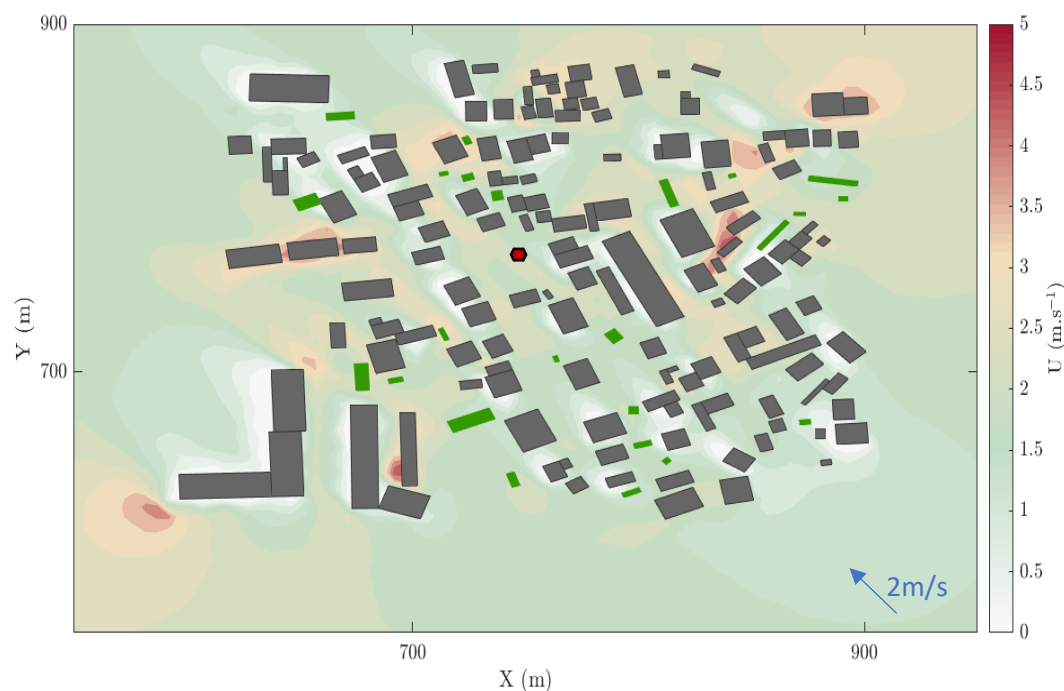


Figura 80- Representação do campo de ventos no domínio de Teixugueira-Estarreja para vento de SE e intensidade de 2 m.s^{-1} .

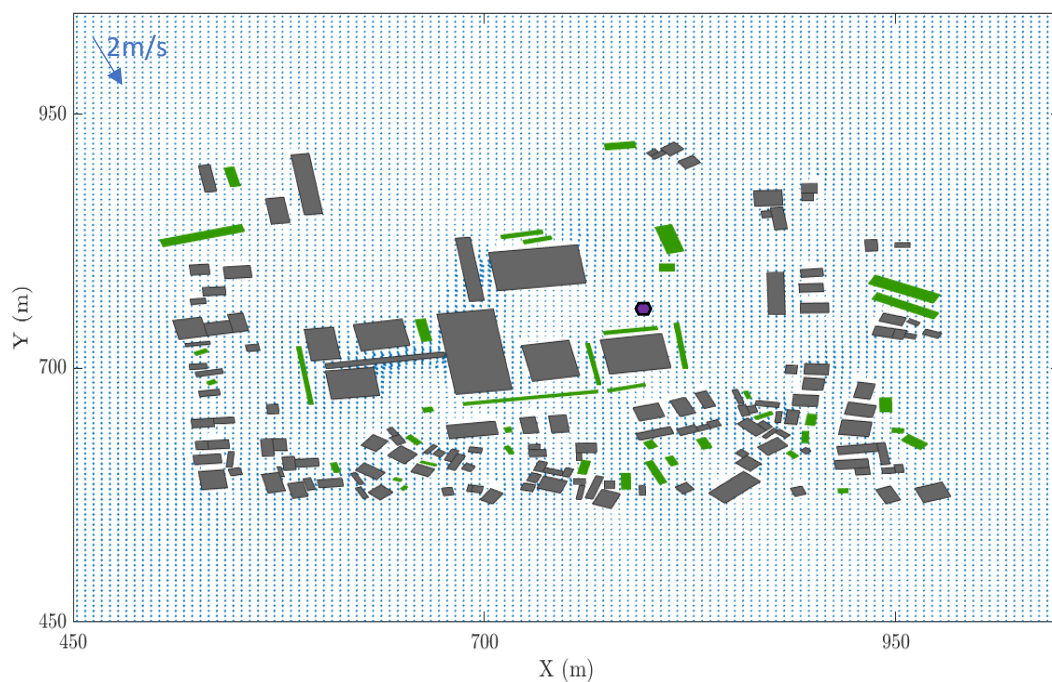


Figura 81- Representação da direção do escoamento no domínio da Escola Secundária de Estarreja para vento de NNW e intensidade de 2 m.s^{-1} .

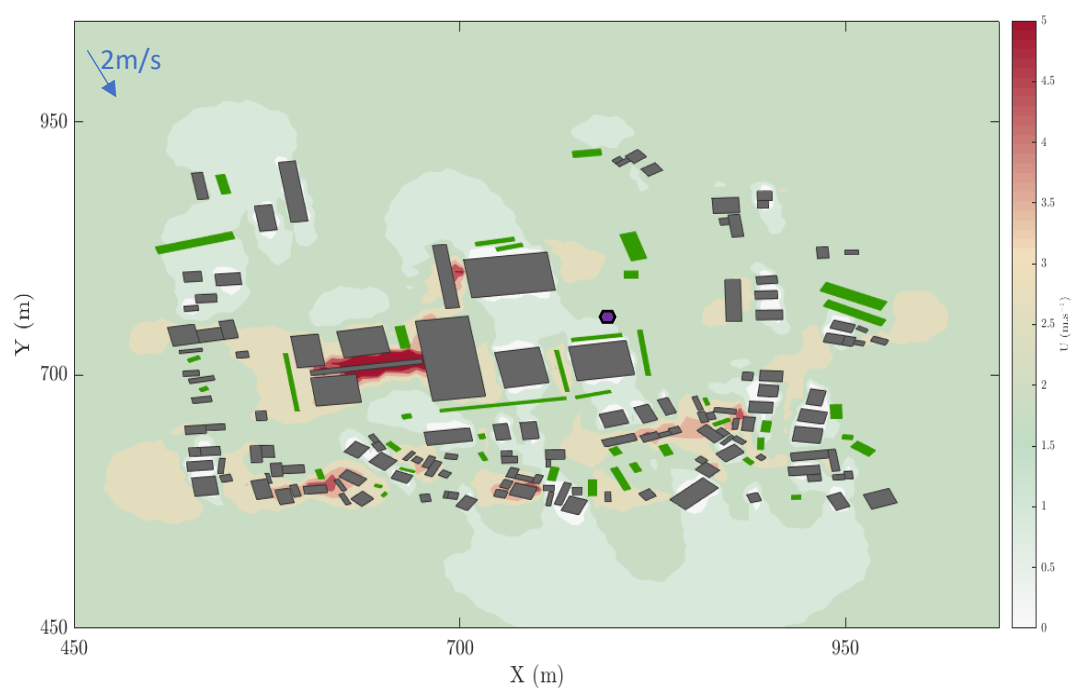


Figura 82- Representação do campo de ventos no domínio da Escola Secundária de Estarreja para vento de NNW e intensidade de 2 m.s^{-1} .

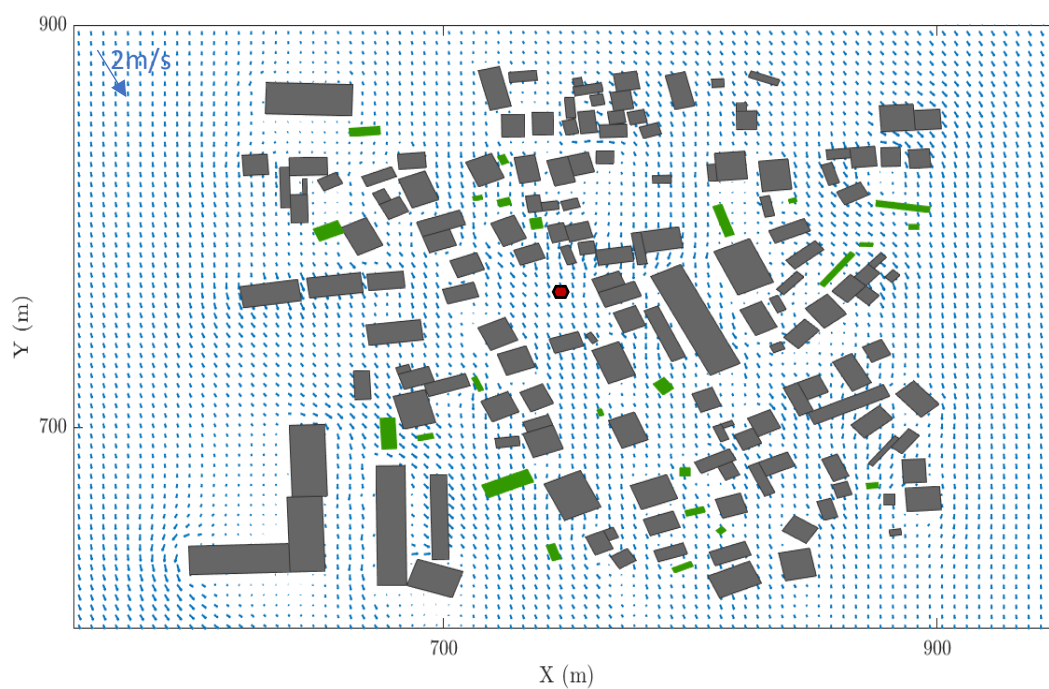


Figura 83- Representação da direção do escoamento no domínio de Teixugueira-Estarreja para vento de NNW e intensidade de 2 m.s^{-1} .

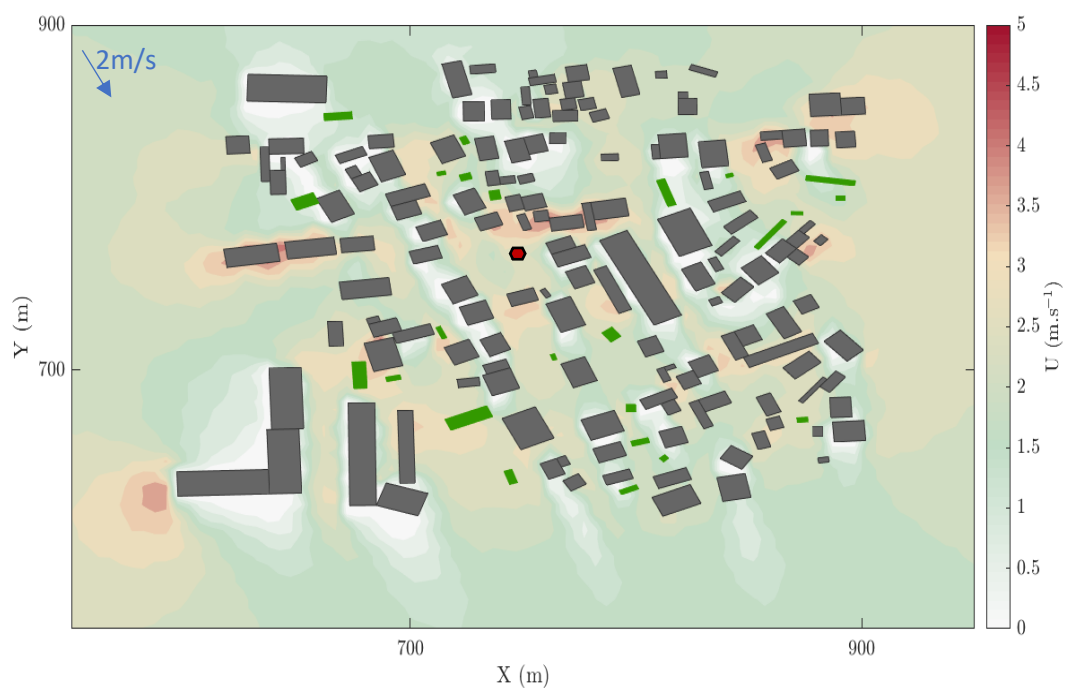


Figura 84- Representação do campo de ventos no domínio de Teixugueira-Estarreja para vento de NNW e intensidade de 2 m.s^{-1} .